# OPTIMIZACIÓN DE LA CONECTIVIDAD EN LA VEREDA LA CHOCHO, BELÉN DE LOS ANDAQUÍES, CAQUETÁ, MEDIANTE EL DISEÑO GEOMÉTRICO Y LA APLICACIÓN DE PAVIMENTACIÓN EN ASFALTITA

HERNAN ALMARIO QUINTERO

UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA, SECCIONAL ALTO MAGDALENA

FACULTAD INGENIERÍA CIVIL-ESPECIALIZACIÓN DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE VÍAS

GIRARDOT, CUNDINAMARCA

MAYO DE 2024

# OPTIMIZACIÓN DE LA CONECTIVIDAD EN LA VEREDA LA CHOCHO, BELÉN DE LOS ANDAQUÍES, CAQUETÁ, MEDIANTE EL DISEÑO GEOMÉTRICO Y LA APLICACIÓN DE PAVIMENTACIÓN EN ASFALTITA

HERNAN ALMARIO QUINTERO

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR TITULO DE ESPECIALISTA EN DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE VÍAS

DIRECTOR: ING.MICHAEL AFRANIO DIAZ RICARDO

ING.CRISTHIAN DAVID GUZMAN HERNANDEZ

UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA, SECCIONAL ALTO MAGDALENA

GIRARDOT, 2024

# TABLA DE CONTENIDO

CONTENIDO

**Resumen** ..... **9**

**Introducción** ..... **10**

**Justificación** ..... **11**

**1. Objetivos** ..... **12**

1.1 Objetivo general ..... 12

1.2 Objetivos específicos. ..... 12

**2 Problema de investigación** ..... **14**

**3 Marco legal** ..... **15**

3.1 La Ley 105 de 1993: ..... 15

3.2 Manual de Diseño Geométrico de Carreteras del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) ..... 15

3.3 El Manual de Diseño Geométrico de Carreteras del Instituto Nacional de Vías (INVIAS). **¡Error! Marcador no definido.**

3.4 Reglamento Nacional de Tránsito ..... **¡Error! Marcador no definido.**

**4 Marco conceptual** ..... **16**

1. **D**iseño geométrico de vías**:** ..... 16

2. **C**onectividad vial ..... 16

3. **V**ías terciarias ..... 16

4. **A**sfaltita ..... 16

**5 Localización del proyecto** ..... **17**

5.1 Localización general del proyecto ..... 17

**6 Levantamiento topográfico del tramo** ..... **18**

6.1 Georreferenciación ..... 18

6.2 Levantamiento topográfico con equipos ópticos. ..... 18

6.2.1 Metodología de trabajo ..... 18

6.2.2 Personal ..... 20

6.2.3 Equipos ..... 20

6.3 Registro fotográfico ..... 21

**7 Geotecnia** ..... **23**

7.1 Capacidad de soporte del suelo de subrasante. ..... 23

7.2 Calificación del potencial de expansión del suelo de la subrasante de cada una de las unidades de diseño. 25

**8 Diseño de pavimento ..... 27**

8.1 Climatología ..... 27

8.2 Tránsito ..... 28

8.1.1 Aforo vehicular ..... 28

8.1.2 Transito promedio diario semanal y anual ..... 29

8.1.3 Calculo factor camión ..... 30

8.1.4 Cálculo del número de ejes equivalentes en el carril de diseño en el año base. ..... 30

8.1.5 Transito atraído ..... 31

8.1.6 Transito generado ..... 32

8.1.7 Transito generado durante la construcción del proyecto ..... 32

8.1.8 Determinación del número de ejes equivalentes en el carril de diseño durante el periodo de diseño con el nivel de confianza del 85% ..... 33

8.2 Diseño de pavimento flexible metodología AASHTO 1993 ..... 33

8.2.1 Nivel de confiabilidad y desviación estándar ..... 34

8.2.2 Desviación normal del error estándar combinado (S0). ..... 35

8.2.3 Índice de serviciabilidad, (PSI) ..... 35

8.2.4 Determinación de los coeficientes de drenaje, (Mi) ..... 36

8.2.5 Módulo resiliente de la subrasante, (MR) ..... 37

8.2.6 Coeficiente estructural de la capa asfáltica ..... 38

8.2.7 Coeficiente de capa base granular nueva ..... 38

8.2.8 Coeficiente de capa subbase granular ..... 40

8.2.9 Número estructural (SN) ..... 42

8.2.10 Determinación de espesores de la estructura de pavimento ..... 42

8.2.11 Verificación de esfuerzos, deformaciones y deflexiones admisibles criterio shell ..... 43

**9 Diseño geométrico ..... 47**

9.1 Velocidad de diseño ..... 47

9.1.1 Clasificación de la carretera según el tipo de terreno ..... 47

9.1.2 Clasificación de la carretera según sus características ..... 48

9.1.3 Selección de la velocidad de diseño ..... 49

9.2 Vehículo de diseño ..... 51

9.3 Peralte máximo en las curvas ..... 52

9.4 Radio mínimo de diseño ..... 53

9.5 Pendiente máxima de la tangente vertical ..... 53

9.6 Ancho de calzada ..... 54
9.7 Bombeo de la calzada ..... 54
9.8 Resumen de parámetros de diseño del proyecto ..... 55
9.9 Diseño del alineamiento horizontal ..... 57
9.9.1 Formulación de cálculo de curvas horizontales ..... 58
9.10 Diseño del alineamiento vertical ..... 60
9.10.1 Formulación de cálculo de curvas verticales ..... 60
9.10.2 Transición de peralte ..... 63
9.10.3 Secciones utilizadas ..... 63
**10 Conclusiones ..... 64**
**Anexos ..... 67**
**Bibliografía ..... 68**

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Numero de ejes 8.2 ton vs Percentil para hallar resistencia. .....23
Tabla 2 Valores de CBR del tramo en estudio .....24
Tabla 3 Potencial de expansión de un suelo en función del IP y del LL. .....26
Tabla 4 Evaluación de los valores de IP y del LL vs Potencial de expansión del tramo en estudio. .....26
Tabla 5 Registro histórico de días de lluvia.....27
Tabla 6. Composición vehicular de tramo .....28
Tabla 7. Transito promedio diario semanal .....29
Tabla 8. Transito promedio diario anual.....29
Tabla 9. .. Factor camión .....30
Tabla 10. Porcentaje de tránsito generado como función del tránsito normal.....32
Tabla 11. Niveles de confiabilidad sugeridos de acuerdo con la clasificación funcional del camino. .....34
Tabla 12. Determinación de la desviación estándar normal Zr a partir de la confiabilidad. .....34
Tabla 13. Índice de Serviciabilidad en función de la calidad de la vía. .....35
Tabla 14. Coeficientes de drenaje mi recomendada. .....37
Tabla 15. Uso típico de las diferentes clases de subbase granular .....41
Tabla 16. Requisitos de los agregados.....41
Tabla 17. Tipo de terreno según la pendiente.....48
Tabla 18. Valores de la velocidad tramo homogéneo vs jerarquía de vía y tipo de terreno .....50
Tabla 19. Radios mínimos para peralte máximo emax=6% y fricción máxima.....53
Tabla 20. Relación entre la pendiente máxima (%) y VTR.....54
Tabla 21. Bombeo de la calzada .....54
Tabla 22. Resumen de parámetros de diseño del proyecto.....55
Tabla 23. Estudio de velocidades. .....59
Tabla 24. Resumen de parámetros de diseño del proyecto.....60
Tabla 25. Diseño alineamiento vertical .....62
Tabla 26. Diseño transición de peralte .....63

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Localización.....17
Ilustración 2. Estación Total Topcon GPS 235 W.....20
Ilustración 3. Equipos y herramientas usados para la elaboración de levantamiento topográfico.....20
Ilustración 4. Trazado topográfico.....22
Ilustración 5. Localización de CBR a lo largo del tramo .....24
Ilustración 6. CBR de diseño. .....25
Ilustración 7. Método AASHTO.....38
Ilustración 8. Coeficiente de aportes para bases granulares .....40
Ilustración 9. Coeficiente de aporte para subbases granulares .....42
Ilustración 10. Estructura de diseño AASHTO 93 .....43
Ilustración 11. Verificación de esfuerzos y deformación con CEDEM para la alternativa 1 .....45
Ilustración 12. Verificación de esfuerzos y deformación con CEDEM para la alternativa 2 .....46
Ilustración 13. Vehículo de diseño .....52
Ilustración 14. Diseño Planta y Perfil .....56
Ilustración 15. Detalle de perfil .....56
Ilustración 16. Secciones Transversales .....57
Ilustración 17. Elementos de las curvas horizontales .....58
Ilustración 18. Elementos de curvas verticales.....61
Ilustración 19. Sección típica de una sola calzada.....63

**Agradecimientos**

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la culminación de este trabajo de grado.

En primer lugar, agradezco a Dios por permitirme llegar a este momento con éxito y por brindarme la fortaleza y el conocimiento necesarios para superar cada desafío que se presentó a lo largo de este proceso.

A mi asesor de trabajo de grado, le extiendo mi más sincera gratitud. Su constante disposición y voluntad para guiarme, así como su paciencia para aclarar mis dudas, fueron fundamentales para la realización de este proyecto. Su experiencia y consejos fueron un faro que iluminó el camino, permitiéndome avanzar con confianza y seguridad.

A mis padres, gracias por creer siempre en mí y por ser mi pilar de apoyo incondicional. Su amor, sacrificio y fe en mis capacidades me motivaron a seguir adelante y a dar lo mejor de mí en cada etapa de este recorrido académico. Sin su respaldo y comprensión, este logro no habría sido posible.

Finalmente, quiero agradecer a todos mis familiares y amigos, quienes, con su ánimo y apoyo emocional, contribuyeron a que esta meta se hiciera realidad. Cada palabra de aliento y cada gesto de apoyo significaron mucho para mí.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento

## Resumen

El presente trabajo se centra en el diseño geométrico de una vía y la estructura de pavimentos en asfaltita con el objetivo de mejorar la conectividad en la vereda La Chocho, ubicada en Belén de los Andaquíes, departamento de Caquetá. La vereda al encontrarse en zona rural, dificulta el acceso de los habitantes a servicios básicos y limita el desarrollo económico de la comunidad. Además, la precaria condición de las vías terciarias existentes obstaculiza el transporte de productos agrícolas y pecuarios, afectando la comercialización y generación de ingresos de los residentes.

La metodología propuesta para este proyecto se basa en una revisión bibliográfica exhaustiva, un estudio de suelos para conocer la composición de este y proceder a obtener el CBR para el diseño, levantamiento topográfico detallado de la zona y la selección de materiales adecuados para la construcción de la vía. Se realizará un diseño geométrico siguiendo las normas y reglamentaciones establecidas por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), considerando la alineación horizontal y vertical, las secciones transversales y la ubicación de intersecciones y accesos. Además, se llevará a cabo el diseño de la estructura de pavimentos en asfaltita, teniendo en cuenta los materiales seleccionados y las cargas que soportará la vía.

La construcción de esta vía en pavimento flexible mejorará significativamente la conectividad en la vereda La Chocho, facilitando el acceso a servicios básicos, promoviendo el intercambio comercial y potenciando el desarrollo económico de la comunidad. Asimismo, se espera que esta infraestructura contribuya al mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes y genere nuevas oportunidades de empleo.

## Introducción

En el departamento del Caquetá, una de las principales dificultades que enfrentan las comunidades rurales es la falta de conectividad vial. Muchas de las veredas del municipio de Belén de los Andaquíes, por ejemplo, presentan vías terciarias en mal estado o incluso inexistentes, lo que dificulta el acceso a los servicios básicos, la movilización de los habitantes y la comercialización de los productos agrícolas. En este contexto, la proyección y diseño de una vía terciaria en la vereda La Chocho se convierte en una necesidad apremiante para mejorar la calidad de vida de sus habitantes y contribuir al desarrollo sostenible de la región. Con esta investigación se espera contribuir a la mejora de la accesibilidad y movilidad de la vereda La Chocho, y aportar a la discusión sobre el desarrollo rural sostenible en esta región del Caquetá

## Justificación

La construcción y mantenimiento de vías terciarias en zonas rurales es un tema crucial para el desarrollo sostenible de las regiones. En el departamento del Caquetá, la falta de conectividad vial es una problemática recurrente que afecta la calidad de vida de las comunidades y limita su acceso a servicios básicos como salud, educación y abastecimiento de alimentos(Narvaez & Narváez, n.d.). Además, la movilidad precaria en estas zonas puede afectar la comercialización de los productos agrícolas y limitar el acceso a nuevos mercados.

En este contexto, la vereda La Chocho del municipio de Belén de los Andaquíes es una zona en la que la falta de vías terciarias dificulta el acceso a los servicios básicos y la movilización de los habitantes. La construcción de una vía terciaria en la vereda La Chocho tendría un impacto positivo en la calidad de vida de la población local(Wilder & Cuellar, n.d.), facilitaría la comercialización de los productos agrícolas y mejoraría la conectividad de la región.

Es necesario realizar el diseño geométrico y estructura de pavimento en asfaltita que mejore la conectividad y la movilidad en la vereda La Chocho. La construcción de una vía en estas condiciones permitiría el acceso más fácil y seguro a los servicios básicos, así como una mejor comercialización de los productos agrícolas y pecuarios(Narvaez & Narváez, n.d.). Además, la construcción de esta vía tendría un impacto positivo en la economía de la comunidad, ya que permitiría la generación de empleo y el desarrollo de nuevas oportunidades de negocio.

# 1. Objetivos

## 1.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar el diseño geométrico y estructura de pavimento en asfaltita de una vía terciaria de 1.8 kilómetros de longitud en la vereda La Chocho del municipio de Belén de los Andaquíes, Caquetá, para mejorar la conectividad de la región y contribuir al desarrollo económico de la comunidad.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Realizar levantamiento topográfico, incluyendo el perfil longitudinal de la vía y secciones transversales, con el fin de establecer una base sólida para el proyecto.

- Ejecutar el estudio de caracterización del suelo del tramo, con métodos como ensayos in situ y de laboratorio, para determinar las propiedades mecánicas y físicas del terreno.

- Elaborar el diseño de la estructura de pavimentos en asfaltita, considerando aspectos como la resistencia al tránsito, la durabilidad y la respuesta ante condiciones climáticas adversas, garantizando la integridad y funcionalidad de la vía terciaria.

- Desarrollar diseño geométrico en planta, perfil y sección transversal del tramo, utilizando software especializado y normativas vigentes, para definir con precisión la configuración y dimensiones de la vía, optimizando su capacidad, seguridad y eficiencia operativa.

# 2 Problema de investigación

En la actualidad, existe una carretera que ha sido construida por la comunidad local a lo largo de los años. La vía presenta características variables, siendo su material principal material de río o agregado, que la comunidad proporciona para tener acceso a sus terrenos. Tiene un ancho promedio de entre 4.5 y 5 metros, y hay una zona de la calzada en el punto kilométrico 1.3 que presenta pérdida. Los habitantes de la zona son los responsables de realizar el mantenimiento de la vía.

La falta de compromiso por parte de la administración municipal y la gobernación a través de los años se ve reflejado en el descuido de sus vías, las cuales son muy importantes para el desarrollo de la región, este problema por falta de movilidad genera afectación a las necesidades básicas de la comunidad, como salud, educación, abastecimiento de alimentos, sin contar con el desarrollo social, económico y cultural que también se ve afectado.

Las actividades económicas principales de esta zona son: la ganadería, la piscicultura, la porcicultura y diferentes cultivos, de los cuales los más importantes son plátano, limón, palmas y arboles maderables.

Estas actividades aportan un fuerte impacto a la economía de la región.

# 3 Marco legal

3.1 La Ley 105 de 1993:

Establece el régimen de tránsito y transporte terrestre en Colombia, y establece los principios y normas para la planificación, diseño, construcción, operación y mantenimiento de la infraestructura vial en el país.

3.2 Manual de Diseño Geométrico de Carreteras del Instituto Nacional de Vías (INVIAS)

Establece los criterios y procedimientos para el diseño geométrico de carreteras en Colombia, incluyendo el diseño de alineaciones horizontales y verticales, el diseño de intersecciones y la selección de la sección transversal de la carretera.

3.3 Manual de Diseño de Pavimentos Asfalticos para vías con bajos volúmenes de transito Instituto Nacional de Vías (INVIAS).

3.4 Normatividad ASSTHO.

# 4 Marco conceptual

4.1

1. **D**ISEÑO GEOMÉTRICO DE VÍAS**:**

Se puede hacer referencia a los principios y técnicas de diseño geométrico de vías, como la selección de la alineación horizontal y vertical, la determinación de las secciones transversales y la ubicación de las intersecciones y accesos. (Invias, Manual de diseño geométrico, n.d)

2. **C**ONECTIVIDAD VIAL

La conectividad vial se refiere a la capacidad de interconectar diferentes lugares y regiones a través de una red de vías y carreteras, es la infraestructura que permite el desplazamiento eficiente y seguro de personas, bienes y servicios entre distintos puntos geográficos. (Salazar & Prieto, n.d)

3. **V**ÍAS TERCIARIAS

Las vías terciarias son aquellas que conectan áreas rurales y comunidades locales, generalmente de baja densidad poblacional, con centros urbanos más grandes o con otras vías de mayor capacidad. Estas vías son de carácter local y suelen tener una menor longitud y ancho en comparación con las vías principales. (Narváez & Narváez, n.d)

4. **A**SFALTITA

Es un tipo de asfalto natural que se utiliza en la construcción de vías y pavimentos. Se trata de un material bituminoso de origen natural que se encuentra en depósitos subterráneos. A

diferencia del asfalto convencional, la asfaltita contiene un mayor porcentaje de betún, lo que le confiere propiedades específicas. (Garavito et al., 2021)

# 5 Localización del proyecto

## 5.1 LOCALIZACIÓN GENERAL DEL PROYECTO

Ubicación del proyecto, se encuentra en el departamento del Caquetá, en la vereda la Chocho, que hace parte del municipio de Belén de los Andaquies, exactamente en el km 13 vía Morelia-Belén.

*Ilustración 1. Localización*

# 6 Levantamiento topográfico del tramo

## 6.1 GEORREFERENCIACIÓN

La georreferenciación se hizo a partir de una pareja de mojones georreferenciados con el sistema origen nacional o CTM 12.

## 6.2 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO CON EQUIPOS ÓPTICOS.

### 6.2.1 Metodología de trabajo

Se inicia el levantamiento topográfico del predio, con el Método de radiación con detalles levantando los vértices del predio con coordenadas Norte, Este y Elevación, además de los detalles relevantes que se encuentran en el entorno del inmueble como mejoras, cercas, vías vehiculares y peatonales, postes, pozos, fuentes hídricas, entre otros.

Para alcanzar el objetivo principal se propone una metodología que permitirá el análisis del uso de las diferentes técnicas y desglosar el paso a paso que se debe llevar a cabo al momento de realizar un levantamiento topográfico desde su planeación, pasando por el análisis de la información, hasta la generación de un producto final que servirá de base para muchos proyectos. A continuación, se describe la metodología definida en 7 pasos, estos se describen de la siguiente manera:

1. Se hace un reconocimiento del sitio de trabajo, para identificar los puntos de amarre o de partida.

2. Se define la trayectoria o trazado de la poligonal a levantar entre parejas de mojones, garantizando la visibilidad y la ubicación estratégica de cada Delta.

3. Para la medición de los ángulos y las distancias se tiene en cuenta que debe hacerse en el sentido de las manecillas del reloj, tomando ángulos externos.

4. Después de medir cada ángulo en el Delta armado, se procede a la toma de los detalles por el método de radiación.

5. Después del trabajo de campo se procede hacer los cálculos de oficina, empezando por el caculo de ajuste de la poligonal cerrada con sus detalles.

6. Se realiza el respectivo registro fotográfico de todo el proceso, esto con el fin de dejar evidencia del estado actual del relleno y la evolución del trabajo.

7. Finalmente se ajusta la información para generar el respectivo informe y elaboración de los planos correspondientes del predio.

### 6.2.2 Personal

- Un topógrafo.
- Dos auxiliares de campo.

### 6.2.3 Equipos

- Estación total Topcon 235W

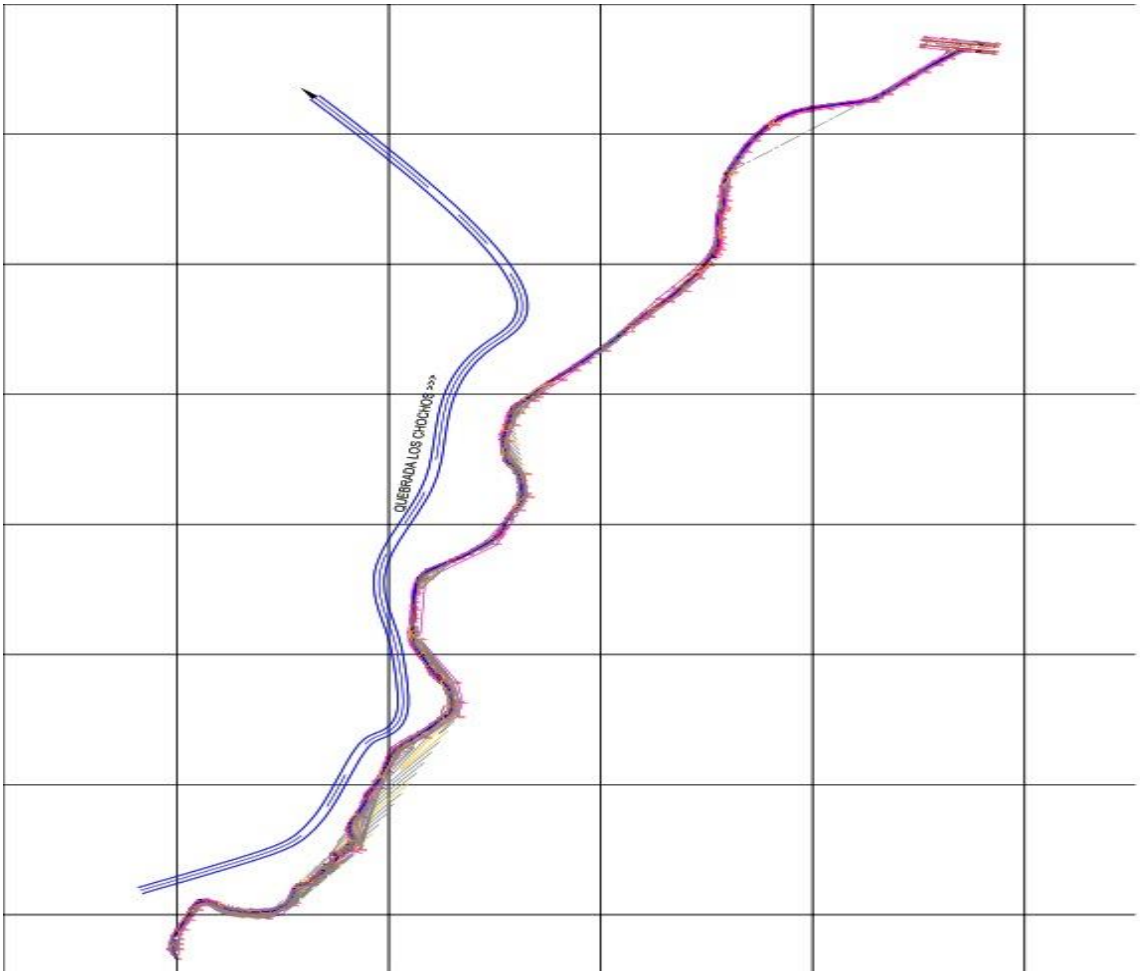
*Ilustración 2. Estación Total Topcon GPS 235 W*

- Radios de comunicación.
- Cinta métrica.

*Ilustración 3. Equipos y herramientas usados para la elaboración de levantamiento topográfico*

## 6.3 REGISTRO FOTOGRÁFICO

*Ilustración 4. Trazado topográfico*




Fuente propia

# 7 Geotecnia

## 7.1 CAPACIDAD DE SOPORTE DEL SUELO DE SUBRASANTE.

La capacidad soporte del suelo se determinó a través del estudio geotécnico y la realización de ensayos de CBR. El valor de CBR de diseño se selecciona siguiendo la metodología recomendada por el Instituto del Asfalto. Según esta metodología, se elige un valor total que sea igual o mayor al 60%, 75% o 87.5% de los valores individuales obtenidos, dependiendo del tránsito esperado sobre la estructura pavimento. A continuación, se muestra la siguiente tabla para mayor claridad.

*Tabla 1. Numero de ejes 8.2 ton vs Percentil para hallar resistencia.*

| **Límites para la selección de resistencia** | |
|---|---|
| **Numero de ejes de 8.2 toneladas en el carril de diseño (N)** | **Percentil por seleccionar para hallar CBR diseño** |
| $<10^4$ | *60%* |
| $10^4$ -$10^6$ | *75%* |
| $>10^6$ | *87.5%* |

*Fuente: (Thickness design – Asphalt pavements for highways and streets Manual Series No 1. Novena edición , 2006)*

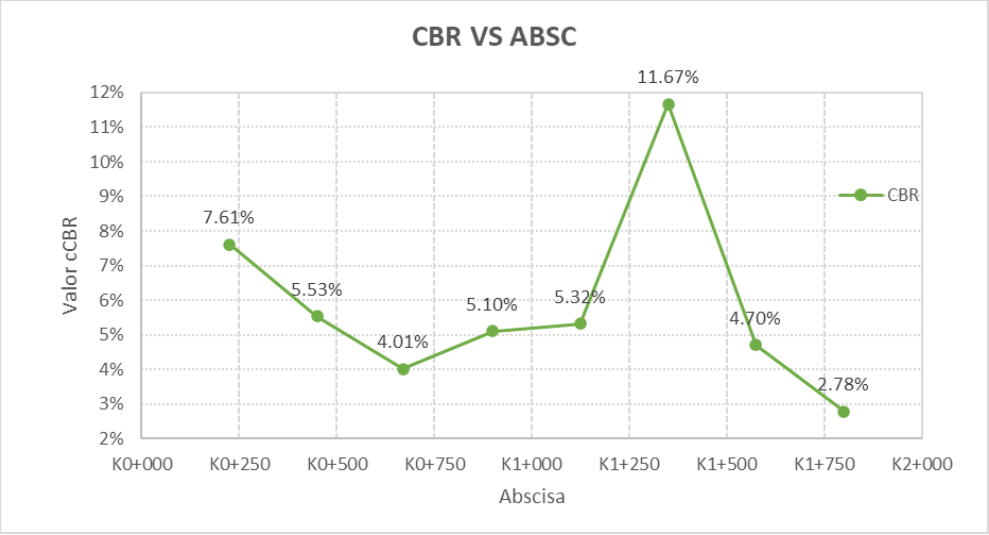
A continuación, se reporta en la mayoría de las muestras muestran la presencia de material tipo arcillas limosas con algunos trazos de arena. Estos materiales son de plasticidad media.

Los valores de CBR (sumergido), se reportan en las tablas de los perfiles de cada apique y oscilan entre 11.7% y 2.8%, en la siguiente tabla se muestra los valores de CBR de cada apique a lo largo del tramo en estudio.

*Tabla 2 Valores de CBR del tramo en estudio*

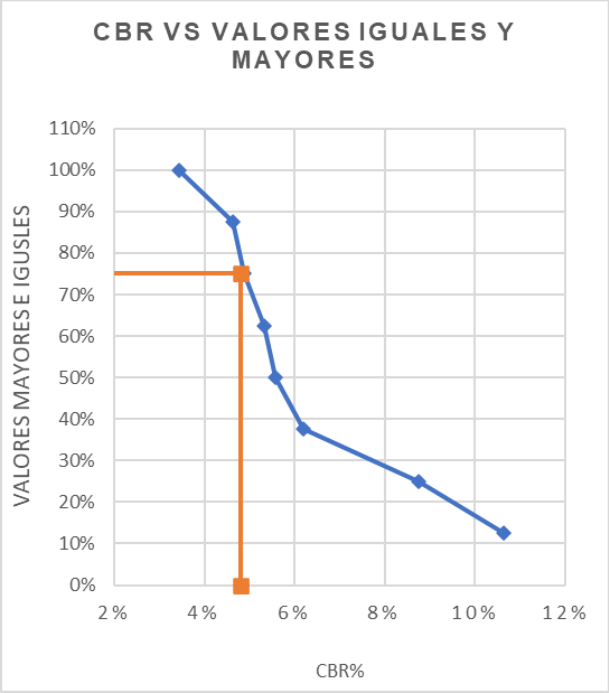
| Vereda La Chocho - Belén de los Andaquies - Caqueta | | | |
|---|---|---|---|
| e | Abscisado | Clasificación | CBR Sumergido |
| 1 | K0+225 | Limo arcilloso marrón | 7.61% |
| 2 | K0+450 | Limo arcilloso marrón rojizo | 5.53% |
| 3 | K0+670 | Limo arcilloso marrón, presenica de gravas | 4.01% |
| 4 | K0+900 | Limo arcilloso marrón con algo de arena | 5.10% |
| 5 | K1+125 | Limo arcilloso marrón | 5.32% |
| 6 | K1+350 | Arcilla marrón rojiza | 11.67% |
| 7 | K1+575 | Limo arcilloso marrón con algo de arena | 4.70% |
| 8 | K1+800 | Arcilla arenosa marrón con algunas gravas | 2.78% |

*Ilustración 5. Localización de CBR a lo largo del tramo*



El percentil a seleccionar la resistencia del suelo es de 75% debido a que el número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas esta entre $10^4$ -$10^6$.

*Ilustración 6. CBR de diseño.*




*Se establece que el CBR de diseño es de 4.8% de acuerdo con el percentil 75%.*

## 7.2 CALIFICACIÓN DEL POTENCIAL DE EXPANSIÓN DEL SUELO DE LA SUBRASANTE DE CADA UNA DE LAS UNIDADES DE DISEÑO.

Analizando la clasificación de las muestras de subrasante tomadas y sus valores del límite líquido y el índice plástico y comparándolas con la correlación presentada en la Tabla 3.

“Potencial de expansión de un suelo en función del IP y del LL.”, permiten determinar las características expansivas de los suelos revisados y los resultados se muestran en la Tabla 4. “Evaluación de los valores de IP y del LL vs Potencial de expansión del tramo en estudio”

*Tabla 3 Potencial de expansión de un suelo en función del IP y del LL.*

| Potencial de expansión | LL [%] | IP [%] |
|---|---|---|
| Alto | >60 | >35 |
| Moderado | 50-60 | 25-35 |
| Bajo | <50 | <25 |

*Fuente: Invías, 2013a, INV. E-132-13*

*Tabla 4 Evaluación de los valores de IP y del LL vs Potencial de expansión del tramo en estudio.*

| LL Y LP | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | ABSCISA | LIMITE LIQUIDO | ÍNDICE PLÁSTICO | POTENCIAL DE EXPANSIÓN |
| 1 | K0+225 | 33.6 | 18.6 | Bajo |
| 2 | K0+450 | 31.3 | 18.8 | Bajo |
| 3 | K0+670 | 33.6 | 22 | Bajo |
| 4 | K0+900 | 36.1 | 20.2 | Bajo |
| 5 | K1+125 | 34.7 | 16.8 | Bajo |
| 6 | K1+350 | 35.92 | 18.62 | Bajo |
| 7 | K1+575 | 36.67 | 18.4 | Bajo |
| 8 | K1+800 | 37.36 | 18.18 | Bajo |

Los datos presentados en la anterior tabla demuestran que el suelo no muestra signos que lo califiquen como susceptible a la expansión.

# 8 Diseño de pavimento

## 8.1 CLIMATOLOGÍA

En la localidad de Belén de los Andaquíes, los veranos se caracterizan por ser breves, cálidos y con cielos mayormente nublados, mientras que los inviernos son cortos, calurosos, lluviosos y predominantemente nublados, con una sensación opresiva que perdura a lo largo de todo el año. La temperatura oscila típicamente entre los 22 °C y los 31 °C, raramente descendiendo por debajo de los 20 °C o superando los 34 °C.

*Tabla 5 Registro histórico de días de lluvia*

| REGISTRO HISTORIO CON DÍAS DE LLUVIA ESTACIÓN PLUVIOMÉTRICA BELÉN DE ANDAQUIES [44040020] | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Año | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | sept | oct | nov | dic | Dias con lluvias al año | |
| 2000 | 9 | 12 | 15 | 15 | 20 | 19 | 19 | 19 | 16 | 16 | 13 | 13 | **186** | **51%** |
| 2001 | 10 | 10 | 16 | 18 | 19 | 21 | 19 | 15 | 14 | 15 | 18 | 13 | **188** | **52%** |
| 2002 | 6 | 14 | 18 | 18 | 22 | 20 | 17 | 16 | 9 | 13 | 17 | 9 | **179** | **49%** |
| 2003 | 10 | 16 | 16 | 15 | 22 | 19 | 16 | 13 | 13 | 14 | 11 | 17 | **182** | **50%** |
| 2004 | 7 | 8 | 13 | 18 | 20 | 20 | 17 | 13 | 12 | 11 | 17 | 14 | **170** | **47%** |
| 2005 | 11 | 12 | 21 | 20 | 15 | 20 | 13 | 7 | 13 | 15 | 19 | 13 | **179** | **49%** |
| 2006 | 13 | 7 | 17 | 16 | 15 | 16 | 16 | 12 | 12 | 16 | 16 | 15 | **171** | **47%** |
| 2007 | 12 | 5 | 16 | 21 | 20 | 19 | 13 | 15 | 8 | 17 | 10 | 12 | **168** | **46%** |
| 2008 | 8 | 12 | 18 | 18 | 21 | 18 | 15 | 15 | 16 | 14 | 12 | 10 | **177** | **48%** |
| 2009 | 14 | 13 | 19 | 17 | 17 | 24 | 17 | 14 | 9 | 16 | 10 | 10 | **180** | **49%** |
| 2010 | 7 | 18 | 14 | 21 | 14 | 17 | 15 | 12 | 10 | 11 | 14 | 13 | **166** | **45%** |
| 2011 | 9 | 11 | 12 | 20 | 18 | 14 | 19 | 13 | 12 | 11 | 12 | 13 | **164** | **45%** |
| 2012 | 8 | 7 | 15 | 18 | 10 | 11 | 17 | 14 | 11 | 8 | 10 | 10 | **139** | **38%** |
| 2013 | 6 | 9 | 11 | 14 | 8 | 11 | 11 | 17 | 8 | 12 | 10 | 10 | **127** | **35%** |
| 2014 | 6 | 8 | 12 | 13 | 14 | 10 | 12 | 11 | 6 | 10 | 7 | 7 | **116** | **32%** |
| 2015 | 14 | 8 | 13 | 15 | 12 | 9 | 9 | 8 | 8 | 6 | 6 | 5 | **113** | **31%** |
| 2016 | 2 | 8 | 9 | 9 | 12 | 11 | 8 | 5 | 10 | 10 | 10 | 9 | **103** | **28%** |
| 2017 | 7 | 9 | 16 | 14 | 13 | 12 | 12 | 12 | 9 | 7 | 11 | 7 | **129** | **35%** |
| 2018 | 7 | 3 | 11 | 17 | 13 | 15 | 9 | 9 | 7 | 12 | 14 | 6 | **123** | **34%** |
| 2019 | 12 | 6 | 16 | 9 | 15 | 17 | 15 | 8 | 14 | 10 | 12 | 11 | **145** | **40%** |
| 2020 | 7 | 7 | 10 | 11 | 14 | 11 | 12 | 7 | 7 | 9 | 9 | 10 | **114** | **31%** |
| 2021 | 9 | 7 | 9 | 12 | 11 | 11 | 13 | 6 | 9 | 11 | 9 | 7 | **114** | **31%** |
| 2022 | 5 | 9 | 10 | 11 | 13 | 8 | 10 | 10 | 7 | 11 | 8 | 7 | **109** | **30%** |
| 2023 | 10 | 8 | 13 | 10 | 10 | 14 | 8 | 10 | 7 | 9 | 12 | 11 | **122** | **33%** |
| **PROMEDIOS MULTIANUALES** | 9 | 9 | 14 | 15 | 15 | 15 | 14 | 12 | 10 | 12 | 12 | 11 | **149** | |
| | 29% | 32% | 47% | 51% | 51% | 51% | 46% | 39% | 34% | 39% | 40% | 35% | **41%** | |

Mediante el análisis de los registros históricos de precipitación obtenidos del portal del IDEAM, se ha generado una tabla que representa el conteo de días con lluvia. Este análisis ha permitido

calcular el promedio multianual de días lluviosos, el cual se ha determinado como un 41% de días de lluvia en el año.

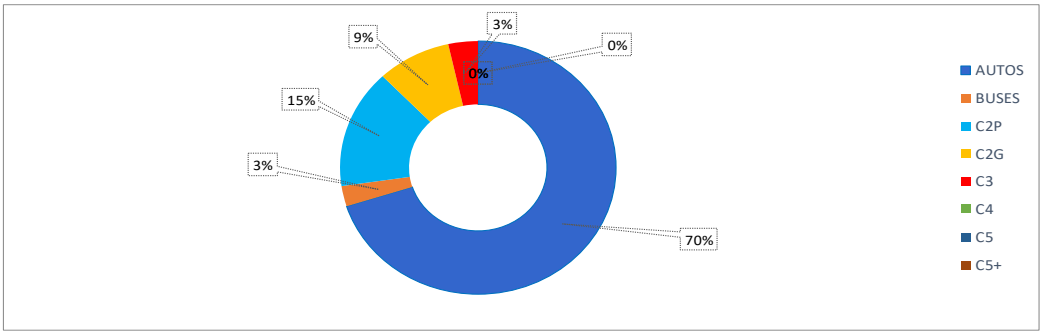
## 8.2 TRÁNSITO

Con la información obtenida del estudio de tránsito se obtuvieron los valores de TPD teniendo en cuenta los valores normales del corredor, series históricas, el transito atraído y generado por la construcción del corredor vial. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para un TPD de año 2023 que para efectos de este diseño se toma como base para calcular el número de ejes equivalentes 8.2 toneladas.

### 8.2.1 Aforo vehicular

*Tabla 6. Composición vehicular de tramo*

| COMPOSICION VEHICULAR DURANTE LA TOMA DE INFORMACION | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DIA AFORO | AUTOS | BUSES | CAMIONES | | | | | | TOTAL |
| | | | C2P | C2G | C3 | C4 | C5 | C5+ | |
| Lunes | 58 | 2 | 2 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | **65** |
| Martes | 31 | 2 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | **36** |
| Miércoles | 22 | 2 | 6 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | **31** |
| Jueves | 28 | 2 | 2 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | **36** |
| Viernes | 66 | 2 | 22 | 2 | 4 | 0 | 0 | 0 | **96** |
| Sábado | 85 | 2 | 30 | 29 | 10 | 0 | 0 | 0 | **156** |
| Domingo | 33 | 0 | 7 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | **41** |
| **SUMATORIA** | **323** | **12** | **70** | **40** | **16** | **0** | **0** | **0** | **461** |
| **Composición vehicular (%)** | **70.1%** | **2.6%** | **15.2%** | **8.7%** | **3.5%** | **0.0%** | **0.0%** | **0.0%** | **100%** |



Los aforos vehiculares se realizaron durante doce horas iniciando a las 6:00 am y finalizando a las 6:00 pm, esto dado a que son las horas donde se generan mayor volumen vehicular y por motivo de seguridad del personal que realiza el aforo.

### 8.2.2 Transito promedio diario semanal y anual

*Tabla 7. Transito promedio diario semanal*

| CALCULO TRANSITO PROMEDIO DIARIO SEMANAL | |
|---|---|
| **DIA DE AFORO** | **TRANSITO DIARIO (TDi)** |
| Lunes | 65 |
| Martes | 36 |
| Miércoles | 31 |
| Jueves | 36 |
| Viernes | 96 |
| Sábado | 156 |
| Domingo | 41 |
| **TPDS** | **66** |

*Tabla 8. Transito promedio diario anual*

| CALCULO TRANSITO PROMEDIO DIARIO ANUAL | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **DIA DE AFORO** | **TRANSITO DIARIO (TDi)** | **(TDi-TPDS)²** | **AJUSTE ESTADÍSTICO** | |
| Lunes | 65 | 1 | n | 7 |
| Martes | 36 | 891 | **∑(TDi-TPDS)²/n-1** | 2108 |
| Miércoles | 31 | 1215 | S | 46 |
| Jueves | 36 | 891 | Zc (90%) | 1.282 |
| Viernes | 96 | 909 | Rango inferior TPDA | 44 |
| Sábado | 156 | 8126 | Rango superior TPDA | 88 |
| Domingo | 41 | 618 | | **88** |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **∑(TDi-TPDS)²** | 1265<br>1 | **TPDA esperado** | |

8.2.3 Calculo factor camión

*Tabla 9. .. Factor camión*

| **CALCULO FACTOR CAMIÓN** | | | |
|---|---|---|---|
| **Tipo vehículo** | **porcentaje vehículos comerciales** | **factor de daño** | **Daño equivalente** |
| **C2P** | 15.2% | 1.01 | 0.153 |
| **C2G** | 8.7% | 2.72 | 0.236 |
| **C3** | 3.5% | 3.72 | 0.129 |
| **C4** | 0.0% | 3.72 | 0.000 |
| **C5** | 0.0% | 4.88 | 0.000 |
| **C5+** | 0.0% | 5.23 | 0.000 |
| **BUSES** | ***2.60%*** | 1.00 | 0.026 |
| **% VEHÍCULOS COMERCIALES** | | ***29.93%*** | |
| **FACTOR CAMIÓN** | | **1.82** | |

8.2.4 Cálculo del número de ejes equivalentes en el carril de diseño en el año base.

$$NESE_0 = TPDA * Vc * FD * FDC * FC * 365$$

$TPDA =$ Transito promedio diario anual
$Vc =$ Porcentaje de vehículos comerciales
$FD =$ Factor de distribución direccional
$FDC =$ Factor de distribución por carril
$FC =$ Factor camión

$NESE_0 = 4807$ ejes de 80 kN

- Cálculo del número acumulado de ejes equivalentes en el carril de diseño para el período de diseño (n) (tránsito normal).

$r =$ Tasa de crecimiento anual
$n =$ Periodo de Diseño en años

$$T_{Acumulado} = NESE_0 * \frac{(1-r)^n - 1}{r}$$

$$T_{Acumulado} = 52633 \ \ Ejes\ de\ 80kN$$

8.2.5 Transito atraído

Se puede seguir el estándar del Instituto de Ingenieros de Estados Unidos, que indica que se asigna un porcentaje entre el 5% y el 25% del tránsito normal al tráfico atraído, con un lapso de uno o dos años después de la apertura de la carretera.

$Pta = 25\%$ Porcentaje transito atraído

$$T_{Atraido} = T_{Acumulado} * Pta$$

$$T_{Atraido} = 13158 \ \ Ejes\ de\ 80\ kN$$

### 8.2.6 Transito generado

Se refiere al aumento en la actividad económica y el tráfico generado por la construcción o mejora de una carretera, lo que puede impulsar el desarrollo agrícola, pecuario, minero, industrial, comercial o turístico en una región específica. Este fenómeno requiere un análisis exhaustivo de la producción, la demanda de transporte y los cambios en el uso del suelo para realizar proyecciones precisas. Para este caso se toma las recomendaciones del manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito por medio de la siguiente tabla.

*Tabla 10. Porcentaje de tránsito generado como función del tránsito normal*

| Clasificación del área del proyecto | Población beneficiada, hab | Porcentaje de tránsito generado como función del tránsito normal |
|---|---|---|
| Área con potencial minero alto | Menos de 5000<br>5000 o más | 3.0<br>6.0 |
| Área con potencial agrícola alto | Menos de 5000<br>5000 o más | 2.5<br>5.5 |
| Área con potencial turístico alto | Menos de 5000<br>5000 o más | 2.0<br>3.5 |
| Área de bajo potencial de desarrollo | | 1.5 |

*Fuente: Elaboración propia con base en información del Instituto Nacional de Vías.*

$Ptg = 5.5\%$ Porcentaje transito generado

$T_{Generado} = T_{Acumulado} * Ptg$

$T_{Generado} = 2895 \quad Ejes\ de\ 80\ kN$

### 8.2.7 Transito generado durante la construcción del proyecto

$Camion_{C3} = 15$ Numero de camiones en obra

$Fd_{C3} = 3.42$ Factor de daño para camiones de obra

$Td_{Const.} = 182.5$ Tiempo de construcción

$T_{Construccion} = Camion_{C3} * Fd_{C3} * Td_{Const.}$

$T_{Construccion} = 9362\ Ejes\ de\ 80\ kN$

8.2.8 Determinación del número de ejes equivalentes en el carril de diseño durante el periodo de diseño con el nivel de confianza del 85%

$Zr = 1.036$ Nivel de confianza

$$N'_{80KN} = (T_{Acumulado} + T_{Atraido} + T_{Generado} + T_{Construccion}) * 10^{0.05*Zr}$$

$$N'_{80KN} = \mathbf{87935}\ Ejes\ equivalentes\ de\ 80\ KN$$

## 8.3 DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE METODOLOGÍA AASHTO 1993

La capacidad estructural requerida depende de las solicitaciones del tránsito proyectadas y del periodo de diseño durante el cual, la estructura del pavimento reduce su capacidad de soportar las primeras. De acuerdo con la metodología AASHTO para diseño de pavimentos flexibles, el número estructural requerido se determina con base en la siguiente expresión:

$$\mathrm{Log}(W_{18}) = Z_R \cdot S_O + 9.36 \cdot \mathrm{Log}(\mathrm{SN}+1) - 0.20 + \left[\frac{\left(\mathrm{Log}\frac{\Delta \mathrm{PSI}}{4.2-1.5}\right)}{0.40 + \left(\frac{1094}{(\mathrm{SN}+1)^{5.19}}\right)}\right] + 2.32 \cdot \mathrm{Log}(\mathrm{Mr}) - 8.07$$

Dónde:

$W_{18}$: Número de ejes equivalentes de 8.2Ton esperado al final de la vida útil del pavimento

$Z_R$: Desviación normal estándar

$S_o$: Error estándar combinado de la predicción del comportamiento del tránsito

$\Delta PSI$: Diferencia entre el índice de serviciabilidad inicial y el índice de serviciabilidad final

$Mr$: Módulo resiliente en psi

$SN$: Número estructural requerido por la estructura de pavimento

### 8.3.1 Nivel de confiabilidad y desviación estándar

De acuerdo con la tabla 2.2 del AASHTO GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES 1993 se adopta un nivel de confiabilidad del 90%, obteniendo mediante la tabla desviación estándar normal Zr, del mismo manual, una desviación estándar normal (ZR) de -1.282 como se indica a continuación:

*Tabla 11. Niveles de confiabilidad sugeridos de acuerdo con la clasificación funcional del camino.*

| **Clasificación funcional** | **Nivel de Confiabilidad, R, recomendado** | |
|---|---|---|
| | **Urbana** | **Rural** |
| Interestatales y vías rápidas | 85-99.9 | 80-99.9 |
| Arterias principales | 80-99 | 75-95 |
| Colectoras | 80-95 | 75-95 |
| Locales | 50-80 | 50-80 |

Fuente: AASHTO-93

*Tabla 12. Determinación de la desviación estándar normal Zr a partir de la confiabilidad.*

| ***R* [%]** | 50 | 70 | 75 | 80 | 85 | 90 | 92 | 94 | 95 | 98 | 99.99 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $Z_r$ | 0.000 | -0.524 | -0.674 | -0.841 | -1.037 | -1.282 | -1.405 | -1.555 | -1.645 | -2.054 | -3.750 |

Fuente: AASHTO-93

Por tratarse de una vía rápida rural de tránsito importante, se decide emplear una confiabilidad de 90%, es importante aclarar que la desviación estándar es coherente con las recomendaciones realizadas por el método de diseño[1]

### 8.3.2 Desviación normal del error estándar combinado (S0).

Para pavimentos flexibles dicho parámetro oscila entre 0.40 y 0.50, en este caso particular se empleará 0.45 para efectos de la obtención del valor del SN Requerido, lo anterior al considerar la intervención por realizar en un alcance de construcción de la estructura.

### 8.3.3 Índice de serviciabilidad, (PSI)

Para efectos de la modelación, se adopta un índice de serviciabilidad inicial de 4.2 y un índice de serviciabilidad final de 3, de acuerdo con las recomendaciones de la siguiente tabla:

*Tabla 13. Índice de Serviciabilidad en función de la calidad de la vía.*

| **Índice de Serviciabilidad, *p*** | **Calificación** | **Descripción** |
|---|---|---|
| 0 - 1 | Muy mala | Los pavimentos en esta categoría se encuentran en una situación de perfecto deterioro. Los caminos se pueden pasar a velocidades reducidas y con considerables problemas de manejo. Existen grandes baches y grietas profundas. El deterioro ocurre en un 75% o más de la superficie. |
| 1 - 2 | Mala | Los pavimentos en esa categoría se han deteriorado hasta un punto donde pueden afectar la velocidad de transito de |

| Índice de Serviciabilidad, *p* | Calificación | Descripción |
|---|---|---|
| | | flujo libre. Los pavimentos flexibles pueden tener grandes baches y grietas profundas; el deterioro incluye perdida de áridos, agrietamientos y ahuellamientos, y ocurre en un 50% o más de la superficie. |
| 2 - 3 | Regular | En esta categoría la calidad de manejo es notablemente inferior a la de los pavimentos nuevos, y puede presentar problemas para altos volúmenes de tránsito. Los defectos superficiales en pavimentos flexibles pueden incluir ahuellamientos, parches y agrietamientos. |
| 3 - 4 | Buena | Los pavimentos de esta categoría, si bien no son tan suaves como los "Muy Buenos", entregan un manejo de primera clase y muestran muy poco o ningún signo de deterioro superficial. Los pavimentos flexibles pueden estar comenzando a notar signos de ahuellamiento y fisuración aleatoria. |
| 4 - 5 | Muy buena | Solo los pavimentos nuevos (o casi nuevos) son lo suficientemente suaves y sin deterioro para clasificar en esta categoría. La mayor parte de los pavimentos construidos o recarpeteados durante el año de inspección normalmente se clasifican como muy buenos. |

Fuente: AASHTO GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES 1993

### 8.3.4 Determinación de los coeficientes de drenaje, (Mi)

La determinación de los coeficientes $M_i$ se realiza empleando la tabla AASHTO GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES 1993, teniendo en cuenta un porcentaje del tiempo en que la estructura estará expuesta a niveles de humedad mayores al 25 %, para este caso se considerará un valor de $m_i$ para las capas granulares de 0.9 y para las capas asfálticas de 1.0

*Tabla 14. Coeficientes de drenaje mi recomendada.*

| **Calidad del drenaje** | **AGUA ELIMINADA EN** | **Porcentaje de tiempo en que la nueva estructura de pavimentos está expuesta a niveles de humedad cercanos a la saturación** | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **< 1%** | **1 - 5%** | **5 - 25%** | **>25%** |
| Excelente | 2 horas | 1.40-1.35 | 1.35-1.30 | 1.30-1.20 | 1.2 |
| Buena | 1 día | 1.35-1.25 | 1.25-1.15 | 1.15-1.00 | **1.0** |
| Regular | 1 semana | 1.25-1.15 | 1.15-1.05 | 1.00-0.80 | 0.8 |
| Pobre | 1 mes | 1.15-1.05 | 1.05-0.80 | 0.80-0.60 | 0.6 |
| Deficiente | No drena | 1.05-0.95 | 0.95-0.75 | 0.75-0.40 | 0.4 |

*Fuente: AASHTO GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES 1993*

### 8.3.5 Módulo resiliente de la subrasante, (MR)

La capacidad de la subrasante para la modelación de la estructura es de un CBR de 4.8%. Este parámetro de diseño ha sido calculado con base en el resultado de CBR percentil encontrado en el laboratorio bajo condiciones inalteradas sumergidas. La ecuación empleada para obtener el módulo resiliente es la siguiente:

$$M_R(psi) = 1500 \times CBR$$

Con el objetivo de contemplar el escenario más desfavorable al cual puede llegar a enfrentarse la estructura, es decir, un nivel de saturación del suelo de subrasante se ha decidido emplear el resultado percentil del ensayo sumergido.

Finalmente, el valor empleado es el siguiente:

$$M_R(psi) = 1500 \times 4.8 = 7200\ PSI$$

8.3.6 Coeficiente estructural de la capa asfáltica

Para este proyecto de infraestructura vial, catalogado como una carretera terciaria y situado en las cercanías de una cantera de asfaltita, se ha decidido emplear dicho material como capa de rodadura. Esta elección conlleva beneficios técnicos, económicos y logísticos para la obra.

Por medio de la administración de la cantera ha proporcionado los parámetros técnicos necesarios para su uso, incluyendo un coeficiente de estructura (a) de 0.12 y un módulo de elasticidad (E) de 5000 kg/cm2.

*Ilustración 7. Método AASHTO*

| | | METODO AASHTO | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | PARAMETROS DE RESISTENCIA | | | | |
| e(cm.) | | a | PRUEBA | | | E |
| | | | Descip | Un. | Valor | (Kg/cm$^2$) |
| 10 | MAN-25 | 0,12 | | % | | 5.000 |

8.3.7 Coeficiente de capa base granular nueva

El tipo de base granular se determinó según las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del 2022 del INVIAS, específicamente en el artículo 320. Este artículo establece que, dada la categoría de tránsito T1 del proyecto, se debe emplear una subbase tipo C con un CBR mínimo de 80%. Además, para calcular el coeficiente estructural,

se consultaron los monogramas de la Guía de AASHTO para el diseño de estructuras de pavimentos, los cuales indican que, para un CBR del 80%, el coeficiente (a) es de 0.13.

Tabla 330 — 1. Uso típico de las diferentes clases de base granular

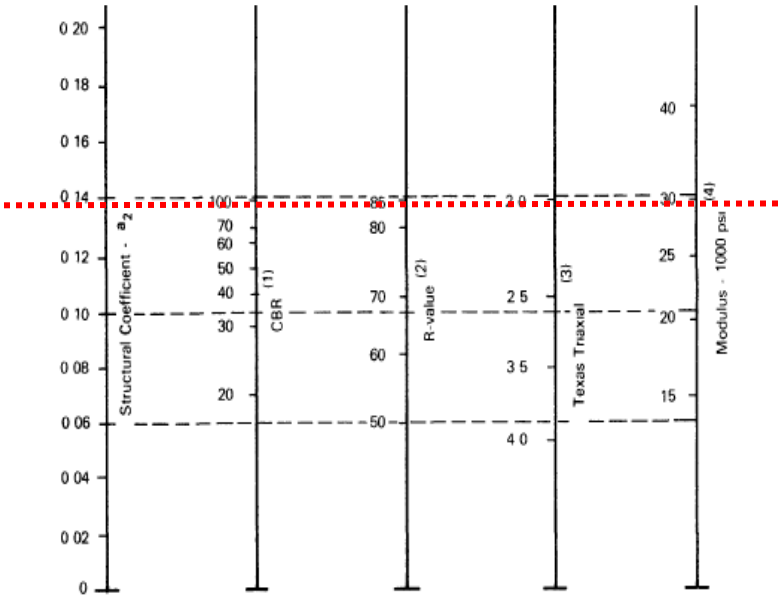
| Clase de base granular | Nivel de tránsito |
|---|---|
| Clase A | NT3 |
| Clase B | NT2 |
| Clase C | NT1 |

Tabla 330 — 2. Requisitos de los agregados para bases granulares

| Característica | Norma de ensayo INV | Base granular | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Clase A | Clase B | Clase C |
| **Dureza (O)** | | | | |
| Desgaste en la máquina de Los Ángeles (Granulometría A), máximo (%):<br>- 500 revoluciones<br>- 100 revoluciones | E-218 | <br>35<br>7 | <br>40<br>8 | <br>40<br>8 |
| Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%). | E-238 | 25 | 30 | - |
| Evaluación de la resistencia mecánica por el método del 10 % de finos:<br>- Valor en seco, mínimo (kN)<br>- Relación húmedo/seco, mínimo (%) | E-224 | <br>90<br>75 | <br>70<br>75 | <br>-<br>- |
| **Durabilidad (O)** | | | | |
| Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%). (Nota 1):<br>- Sulfato de sodio<br>- Sulfato de magnesio | E-220 | <br>12<br>18 | <br>12<br>18 | <br>12<br>18 |
| **Limpieza (F)** | | | | |
| Límite líquido, máximo (%). | E-125 | - | - | 25 |
| Índice de Plasticidad, máximo (%). | E-125 y E-126 | 0 | 0 | 3 |
| Equivalente de arena, mínimo (%). | E-133 | 30 | 30 | 30 |
| Valor de azul de metileno, máximo (Nota 2). | E-235 | 10 | 10 | 10 |
| Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznables, máximo (%). | E-211 | 2 | 2 | 2 |
| **Geometría de las Partículas (F)** | | | | |
| Índices de alargamiento y aplanamiento, máximo (%). | E-230 | 35 | 35 | 35 |
| Caras fracturadas, mínimo (%). (Nota 3):<br>- Una cara<br>- Dos caras | E-227 | <br>90<br>85 | <br>70<br>50 | <br>50<br>- |
| Angularidad de la fracción fina, mínimo (%). | E-239 | 35 | 35 | - |
| **Resistencia de material (F)** | | | | |
| CBR (%): porcentaje asociado al grado de compactación mínimo especificado (numeral 330.5.2.2.2); el CBR se debe medir sobre muestras sometidas previamente a cuatro días (4 d) de inmersión. | E-148 | ≥ 95 | ≥ 80 | ≥ 80 |

*Fuente: Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del 2022 del INVIA*

*Ilustración 8. Coeficiente de aportes para bases granulares*




## 8.3.8 Coeficiente de capa subbase granular

El tipo de subbase granular se determinó según las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del 2022 del INVIAS, específicamente en el artículo 320. Este artículo establece que, dada la categoría de tránsito NT1 del proyecto, se debe emplear una subbase tipo C con un CBR mínimo de 30%. Además, para calcular el coeficiente estructural, se consultaron los monogramas de la Guía de AASHTO para el diseño de estructuras de pavimentos, los cuales indican que, para un CBR del 30%, el coeficiente (a) es de 0.11.

*Tabla 15. Uso típico de las diferentes clases de subbase granular*

Tabla 320 — 1. Uso típico de las diferentes clases de subbase granular

| Clase de subbase granular | Nivel de tránsito |
|---|---|
| Clase A | NT3 |
| Clase B | NT2 |
| Clase C | NT1 |

*Fuente: Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del 2022 del INVIAS.*

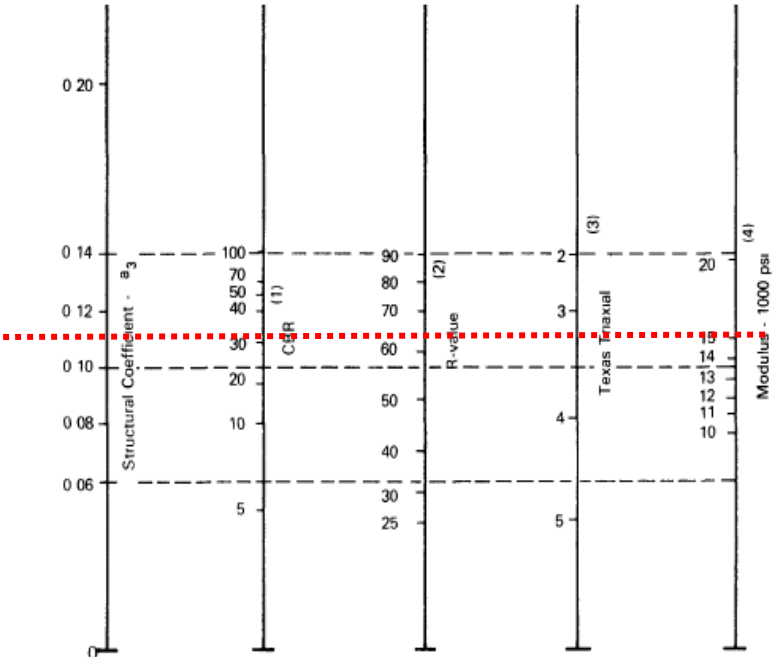
*Tabla 16. Requisitos de los agregados*

Tabla 320 — 2. Requisitos de los agregados para subbases granulares

| Característica | Norma de ensayo INV | Subbase granular | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Clase A | Clase B | Clase C |
| **Dureza (O)** | | | | |
| Desgaste en la máquina de Los Ángeles (Granulometría A), máximo (%):<br>- 500 revoluciones | E-218 | 50 | 50 | 50 |
| Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%). | E-238 | 30 | 35 | - |
| **Durabilidad (O)** | | | | |
| Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%). (Nota):<br>- Sulfato de sodio<br>- Sulfato de magnesio | E-220 | 12<br>18 | 12<br>18 | 12<br>18 |
| **Limpieza (F)** | | | | |
| Límite líquido, máximo (%). | E-125 | 25 | 25 | 25 |
| Índice de Plasticidad, máximo (%). | E-125 y E-126 | 6 | 6 | 6 |
| Equivalente de arena, mínimo (%). | E-133 | 25 | 25 | 25 |
| Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznables, máximo (%). | E-211 | 2 | 2 | 2 |
| **Resistencia del material (F)** | | | | |
| CBR (%): porcentaje asociado al valor mínimo especificado de la densidad seca, medido en una muestra sometida a cuatro días (4 d) de inmersión, mínimo. | E-148 | 40 | 30 | 30 |

*Fuente: Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del 2022 del INVIAS.*

*Ilustración 9. Coeficiente de aporte para subbases granulares*




*Fuente: AASHTO guide for design of pavement structures*

8.3.9 Número estructural (SN)

Utilizando la formulación para pavimentos flexibles según las especificaciones de la AASHTO 93, se determinan los valores de número estructural (SN) para cada una de las capas de la siguiente manera: SN1: 1.366, SN2: 1.785, SN3: 2.42.

8.3.10 Determinación de espesores de la estructura de pavimento

El procedimiento para determinar la estructura que supla las solicitaciones del tránsito, consiste en igualar el número estructural requerido con el obtenido al resolver la siguiente expresión:

$$SNcal = a_1 \times m_1 \times D_1 + a_2 \times m_2 \times D_2 + a_3 \times m_3 \times D_3 \cdots + a_n \times m_n \times D_n$$

Dónde:

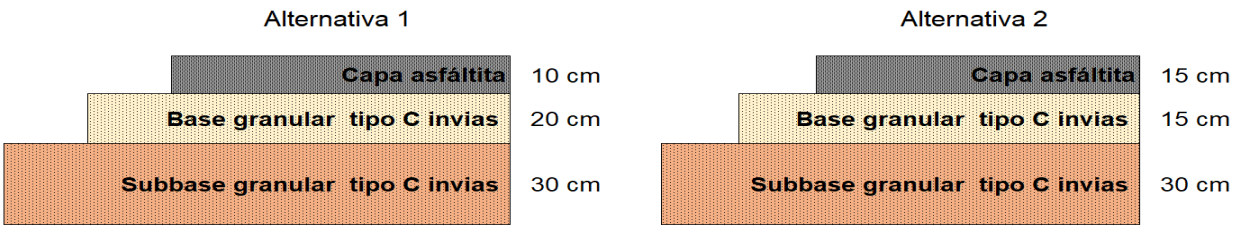
$a_1, a_2 \ldots a_n$ : Coeficientes de aporte de capa de cada material

$m_1, m_2 \ldots m_n$ : Coeficientes de drenaje de cada material

$D_1, D_2 \ldots D_n$ : Espesores de material

Al llevar a cabo la igualación ecuación del número estructural en función de los coeficientes estructurales, de drenaje y espesores de las capas, y tras realizar varias iteraciones que combinan diferentes espesores, se derivan las siguientes dos alternativas.

*Ilustración 10. Estructura de diseño AASHTO 93*




Fuente: Elaboración propia

8.3.11 Verificación de esfuerzos, deformaciones y deflexiones admisibles criterio shell

- Deformación radial admisible de tracción en la base de la capa asfáltica, $\varepsilon_{r_adm}$

$k_1 := 2$ Auto reparación de fisuras pequeñas

$k_2 := 2.5$ Distribución lateral de cargas

$k_3 := 1$ Diferentes temperaturas de trabajo de la mezcla por dia por año

$E_1 = 4.903 \cdot 10^8$ Módulo dinámico de la mezcla asfáltica (N/m^2) $V_b :=$

10.8 Porcentaje en volumen de asfalto de la mezcla, % $K :=$

$\left(\left(k_1 \cdot k_2 \cdot k_3\right)\right) = 5$ Coeficiente de Calage

$N := W = 87935$ Tránsito de diseño expresado en ejes equivalentes de 80 kN

- Deformación de tracción admisible de la capa asfáltica

$$\varepsilon_{r_adm} := \left(0.856 \cdot V_b + 1.08\right) \cdot E_1^{\ -0.36} \cdot \left(\frac{N}{K}\right)^{-0.20} = 1.087 \cdot 10^{-3}$$

- Deformación vertical admisible de compresión sobre la subrasante, $\varepsilon_{z_adm}$

$\varepsilon_{z_adm50} := 2.8 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0.25} = 1.626 \cdot 10^{-3}$ Para un nivel de confianza del 50%

$\varepsilon_{z_adm85} := 2.10 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0.25} = 1.219 \cdot 10^{-3}$ Para un nivel de confianza del 85%

$\varepsilon_{z_adm95} := 1.8 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0.25} = 1.045 \cdot 10^{-3}$ Para un nivel de confianza del 95%

- Esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante, σz_adm
-

$E_s := MR_{SubR} = 506.21 \ \frac{kgf}{cm^2}$ Módulo resiliente de la subrasante (kg/cm2)

$N = 87935$ Tránsito de diseño expresado en ejes equivalentes de 80 KN

$CBR = 4.8$ Capacidad de soporte del suelo de la subrasante (%)

- Esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante (kg/cm2)

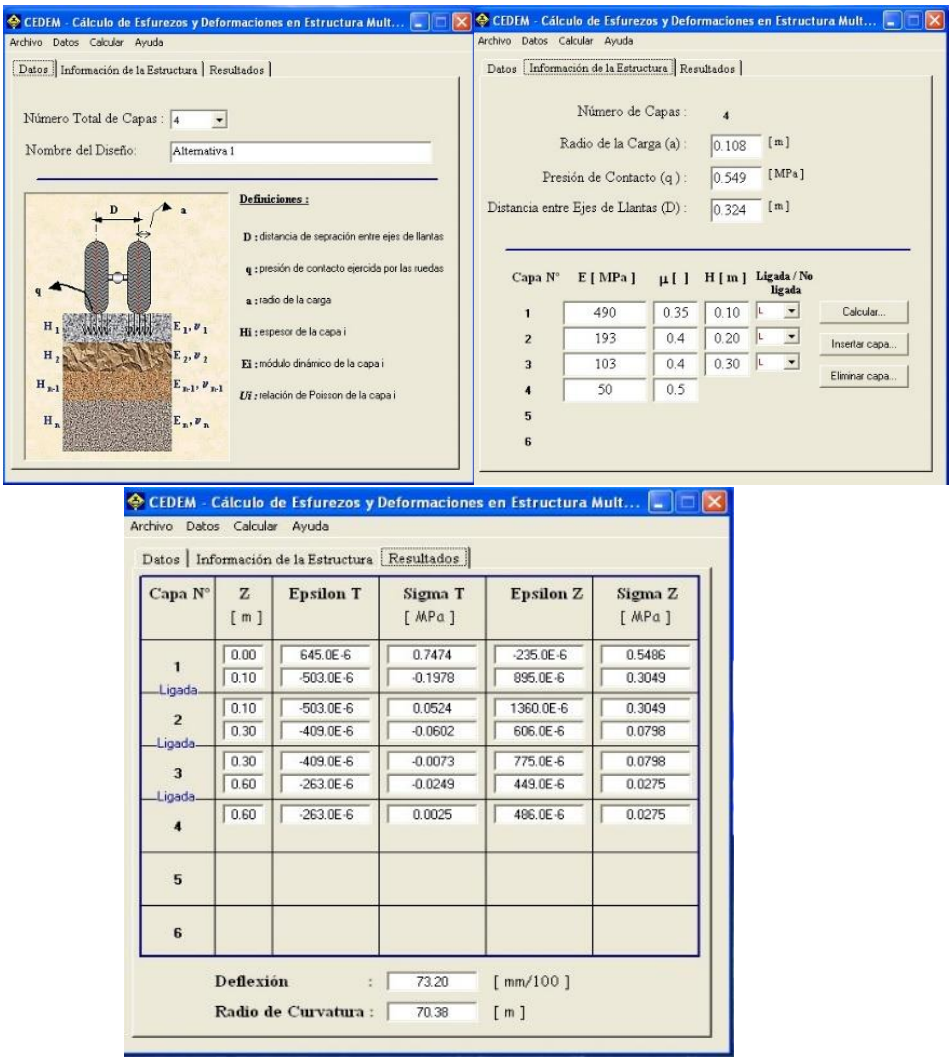
$\sigma_{z_adm1} := \frac{0.007 \cdot E_s}{1 + 0.7 \cdot \log(N)} = 0.794 \ \frac{kgf}{cm^2}$ Criterio de DORMON y KERHOVEN

$\sigma_{z_adm2} := \frac{0.9607 \cdot CBR^{1.2}}{N^{0.229}} = 0.465$ Criterio de la CRR de Bélgica

- Deflexión vertical admisible en la superficie, $\Delta_{z_adm}$

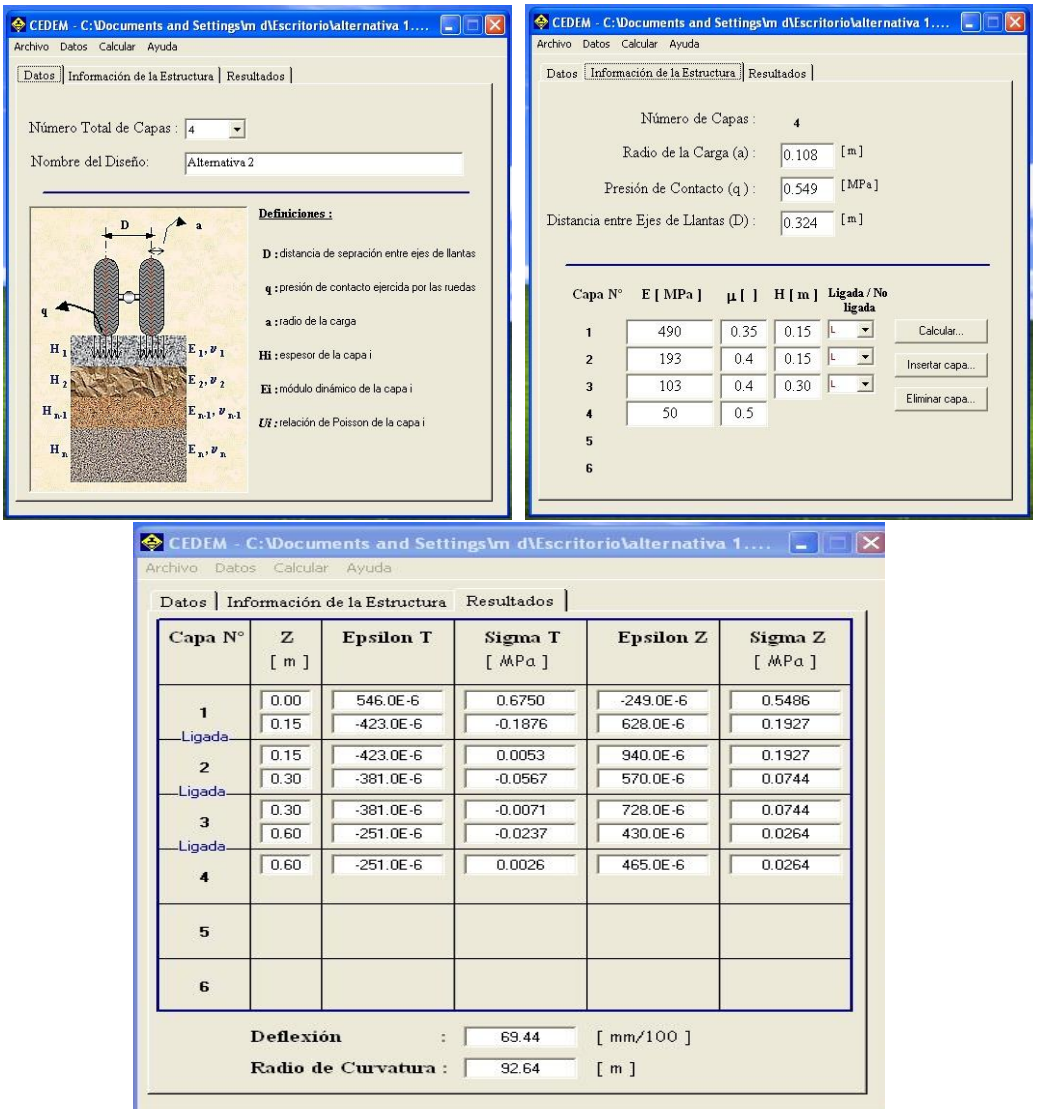
$\Delta_{z_adm} := 26.32202 \cdot N^{-0.2438} = 1.6403$ Deflexión vertical admisible (mm)

*Ilustración 11. Verificación de esfuerzos y deformación con CEDEM para la alternativa 1*




| Verificación alternativa 1 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Criterio** | **Valores máximos admisibles** | **Valores obtenidos CEDEN** | **Solicitación (%)** | **Validación** |
| Deformación de tracción admisible de la capa asfáltica $\varepsilon_{r_adm}$ | 1.09E-03 | 5.03E-04 | 46% | Cumple |
| Deformación vertical admisible de compresión sobre la subrasante $\varepsilon_{z_adm85}$ | 1.22E-03 | 4.86E-04 | 40% | Cumple |
| Esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante $\sigma_{z_adm}$ | 0.078 MPa | 0.0275 | 35% | Cumple |
| Deflexión vertical admisible (mm) $\Delta_{z_adm}$ | 164.034 mm | 73.2 | 45% | Cumple |

*Ilustración 12. Verificación de esfuerzos y deformación con CEDEM para la alternativa 2*




| Verificación alternativa 2 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Criterio** | **Valores máximos admisibles** | **Valores obtenidos CEDEN** | **Solicitación (%)** | **Validación** |
| Deformación de tracción admisible de la capa asfáltica $\varepsilon_{r_adm}$ | 1.09E-03 | 4.23E-04 | 39% | Cumple |
| Deformación vertical admisible de compresión sobre la subrasante $\varepsilon_{z_adm85}$ | 1.22E-03 | 4.65E-04 | 38% | Cumple |
| Esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante $\sigma_{z_adm}$ | 0.078 MPa | 0.0264 | 34% | Cumple |
| Deflexión vertical admisible (mm) $\Delta_{z_adm}$ | 164.034 mm | 69.44 | 42% | Cumple |

# 9 Diseño geométrico

## 9.1 VELOCIDAD DE DISEÑO

Para la determinación de la velocidad en las vías del proyecto, se tomó como referencia las recomendaciones del manual de diseño geométrico de carreteras de INVÍAS. La metodología para determinar la velocidad de diseño está en función de la jerarquía de la vía y el tipo de terreno a continuación se desarrolla en detalle.

### 9.1.1 Clasificación de la carretera según el tipo de terreno

Antes de iniciar el proyecto se debe determinar o analizar los aspectos topográficos que influyen en la explanación como: pendiente longitudinal, pendiente transversal, forma y frecuencia de los cauces de presentarse.

La topografía es un factor principal de la localización física de la vía, pues afecta su alineamiento horizontal, sus pendientes, sus distancias de visibilidad y la sección transversal. Desde el punto de vista del terreno, el ministerio de transporte clasifica los terrenos en cuatro categorías:

a. Terreno Plano: Poseen pendientes transversales a la vía menores del 5% y las pendientes longitudinales de las vías son normalmente menores del 3%.

b. Terreno Ondulado: Se caracteriza por tener pendientes transversales a la vía del 6% al 13% y pendientes longitudinales típicamente del 3% al 6%.

c. Terreno Montañoso: Las pendientes transversales a la vía suelen ser del 13% al 40% y pendientes longitudinales de las vías del 6% al 8% son comunes.

d. Terreno Escarpado: Pendientes transversales a la vía pasan con frecuencia del 40%, por tanto, abundan las pendientes longitudinales mayores del 8%.

*Tabla 17. Tipo de terreno según la pendiente*

| TIPO | PENDIENTE | |
|---|---|---|
| | TRANSVERSAL | LONGITUDINAL |
| Plano | <5º | <3% |
| Ondulado | 6º - 13º | 3% - 6% |
| Montañoso | 13º - 43º | 6% - 8% |
| Escarpado | >40º | >8% |

*Fuente: Instituto Nacional de Vías. Manual de Diseño Geométrico de carreteras. 2008*

Según esta clasificación y de acuerdo con los valores de pendiente tanto como transversales y longitudinales encontrados en la topografía de zona, el proyecto clasifica como un terreno ONDULADO.

### 9.1.2 Clasificación de la carretera según sus características

Se clasificación en tres grupos:

a. Autopistas: Son vías de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles y con control total de acceso.

b. Carreteras multicarriles: Son carreteras divididas o no, con dos o más carriles por sentido y con control parcial de accesos.

c. Carreteras de dos carriles: Constan de una sola calzada de dos carriles, uno por cada sentido de circulación, con intersecciones a nivel y acceso directo desde sus márgenes.

De acuerdo con lo anterior, la vía del proyecto se clasifica como una **CARRETERA DE DOS CARRILES.**

La vía en estudio por conectar al municipio con una vereda se clasifica como una vía **"TERCIARIA".**

### 9.1.3 Selección de la velocidad de diseño

La velocidad es la guía que permite definir las características geométricas mínimas de todos los elementos del trazado en condiciones de comodidad y seguridad.

La velocidad de diseño está definida en función de la categoría de la carretera y el tipo de terreno.

La velocidad con la cual se opera un vehículo en una carretera depende primordialmente de la habilidad del conductor y de la clase y potencia del vehículo, pero además depende de otros factores, tales como:

- Las características físicas de la carretera
- Las condiciones ambientales y climáticas
- La presencia de otros vehículos
- Las limitaciones impuestas por la regulación de tránsito

Teniendo en cuenta los aspectos anteriormente mencionados a este tramo de vía le corresponde el siguiente valor de tramo homogéneo.

- **Velocidad del tramo homogéneo VTR: 30 km/h**
- **Velocidad especifica de los elementos geométricos: 30 km/h**

*Tabla 18. Valores de la velocidad tramo homogéneo vs jerarquía de vía y tipo de terreno*

| CATEGORÍA DE LA CARRETERA | TIPO DE TERRENO | VELOCIDAD DE DISEÑO DE UN TRAMO HOMOGÉNEO $V_{TR}$ (km/h) | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 |
| Primaria de dos calzadas | Plano | | | | | | | | | | |
| | Ondulado | | | | | | | | | | |
| | Montañoso | | | | | | | | | | |
| | Escarpado | | | | | | | | | | |
| Primaria de una calzada | Plano | | | | | | | | | | |
| | Ondulado | | | | | | | | | | |
| | Montañoso | | | | | | | | | | |
| | Escarpado | | | | | | | | | | |
| Secundaria | Plano | | | | | | | | | | |
| | Ondulado | | | | | | | | | | |
| | Montañoso | | | | | | | | | | |
| | Escarpado | | | | | | | | | | |
| Terciaria | Plano | | | | | | | | | | |
| | Ondulado | | | | | | | | | | |
| | Montañoso | | | | | | | | | | |
| | Escarpado | | | | | | | | | | |

*Fuente: Instituto Nacional de Vías. Manual de Diseño Geométrico de carreteras. 2008*

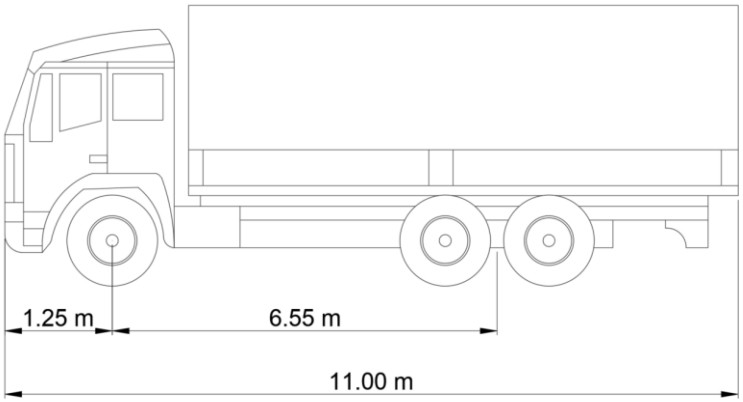
## 9.2 VEHÍCULO DE DISEÑO

El objetivo del diseño geométrico de una carretera es crear un trazado que facilite el flujo de vehículos tanto en términos de dirección como de posición en la vía. El vehículo de diseño es aquel que representa a todos los vehículos que circularán por esa vía en particular.

La elección del vehículo de diseño debe basarse en el análisis del tráfico realizado en el estudio de ingeniería de tránsito para el proyecto. Esta elección tiene un impacto directo en las dimensiones de los carriles, la calzada, las aceras y los espacios adicionales en la sección transversal, así como en el radio mínimo de giro en las intersecciones y la altura libre bajo las estructuras (pasos elevados).

Basándonos en el análisis del estudio de tránsito y considerando el contexto del corredor vial, se ha seleccionado el vehículo de carga C-3 como el vehículo de diseño. A continuación, se muestra una figura que presenta las dimensiones del vehículo de diseño.

*Ilustración 13. Vehículo de diseño*




Fuente: Manual de diseño geométrico de carreteras

## 9.3 PERALTE MÁXIMO EN LAS CURVAS

En el capítulo tres del manual de carreteras de invias establece que para vías terciarias el valor del peralte es del 6%, el cual se adopta para este proyecto.

## 9.4 RADIO MÍNIMO DE DISEÑO

De acuerdo con las recomendaciones del manual de INVÍAS y la guía de diseño de vía urbanas, se explica que el radio mínimo, está en función de la velocidad especifica de la curva horizontal, peralte máximo y coeficiente de fricción transversal, en el capítulo 3, *diseño en planta del eje de la carretera*, se encuentra la tabla 3.4 de la guía de Invias, donde se establecen valores de radio mínimo según la velocidad y de las variables anteriormente nombradas.

Para este caso le pertenece una velocidad 30 Km/h, (la cual se encuentra justificada más adelante), así mismo para este tipo de vías corresponde un radio mínimo de 21 metros.

*Tabla 19. Radios mínimos para peralte máximo emax=6% y fricción máxima.*

| VELOCIDAD ESPECÍFICA ($V_{CH}$) (km/h) | PERALTE MÁXIMO (%) | COEFICIENTE DE FRICCIÓN TRANSVERSAL $f_{Tmáx}$ | TOTAL $e_{máx} + f_{Tmáx}$ | RADIO MÍNIMO (m) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | CALCULADO | REDONDEADO |
| 20 | 6,0 | 0,35 | 0,41 | 7,7 | 15 (1) |
| 30 | 6,0 | 0,28 | 0,34 | 20,8 | 21 |
| 40 | 6,0 | 0,23 | 0,29 | 43,4 | 43 |
| 50 | 6,0 | 0,19 | 0,25 | 78,7 | 79 |
| 60 | 6,0 | 0,17 | 0,23 | 123,2 | 123 |

## 9.5 PENDIENTE MÁXIMA DE LA TANGENTE VERTICAL

La relación entre la pendiente máxima de una tangente vertical y la velocidad de los vehículos está directamente vinculada, siendo la velocidad afectada significativamente por el

tipo de carretera que se está planificando, por lo cual se adopta los criterios del capítulo 4 del Manual de Diseño Geométrico de Carreteras.

*Tabla 20. Relación entre la pendiente máxima (%) y VTR*

| CATEGORÍA DE LA CARRETERA | VELOCIDAD DE DISEÑO DEL TRAMO HOMOGÉNEO $V_{TR}$ (km/h) | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 |
| Primaria de dos calzadas | - | - | - | - | - | 6 | 6 | 6 | 5 | 5 |
| Primaria de una calzada | - | - | - | - | 7 | 7 | 6 | 6 | 5 | - |
| Secundaria | - | - | 7 | 7 | 7 | 7 | 6 | - | - | - |
| Terciaria | 7 | 7 | 7 | - | - | - | - | - | - | |

*Fuente: Tabla 4.1, manual de diseño geométrico de carreteras capítulo 4.*

## 9.6 ANCHO DE CALZADA

Para el proyecto se utilizaron secciones típicas de vía, de una sola calzada, con ancho variable que dependieron de las construcciones existente en campo.

## 9.7 BOMBEO DE LA CALZADA

La pendiente de bombeo normal se elige de la tabla 5.3 del Manual de INVÍAS respecto al tipo de superficie de rodadura.

*Tabla 21. Bombeo de la calzada*

| TIPO DE SUPERFICIE DE RODADURA | BOMBEO (%) |
|---|---|
| Superficie de concreto hidráulico o asfáltico | 2 |
| Tratamientos superficiales | 2 – 3 |
| Superficie de tierra o grava | 2 – 4 |

*Fuente: tabla 5.3 del Manual de INVÍAS.*

## 9.8 RESUMEN DE PARÁMETROS DE DISEÑO DEL PROYECTO

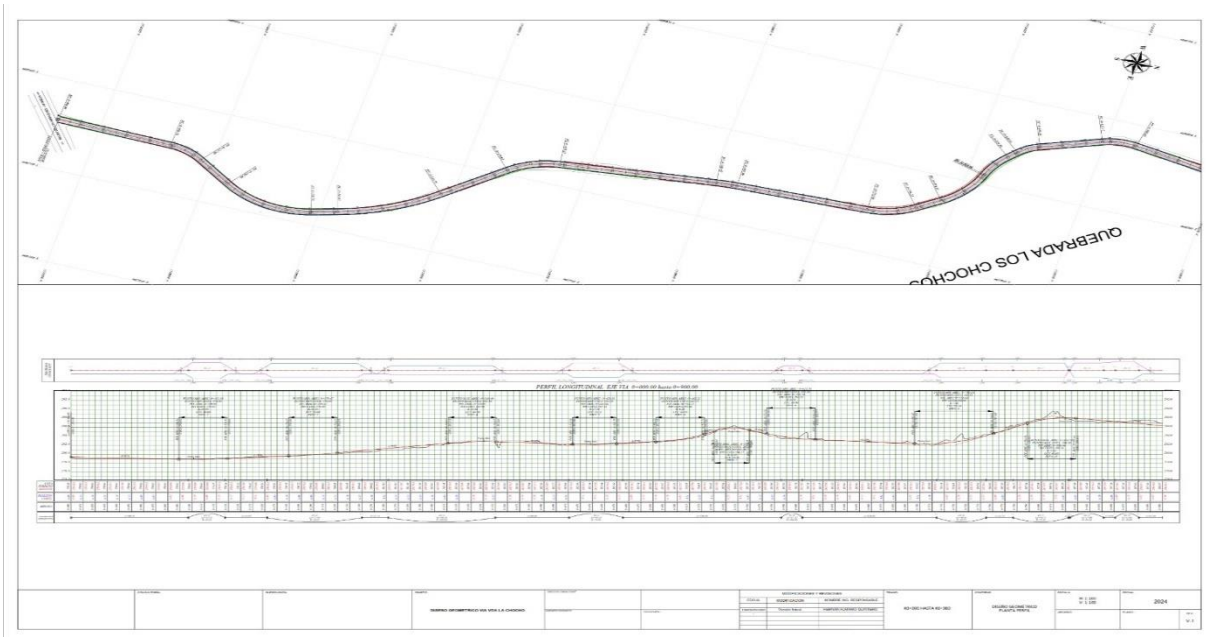
A continuación, en la Tabla 20, se presenta un resumen de los parámetros de diseño del proyecto.

*Tabla 22. Resumen de parámetros de diseño del proyecto*

| **CRITERIOS DE DISEÑO** | **VALOR** |
|---|---|
| Tipo de vía | TERCIARIA |
| Velocidad (VTR) | 30 km/h |
| Ancho de calzada | 6.0m |
| Ancho de carril | 3.0 m |
| Radio mínimo de giro | 21m |
| Peralte medio máximo | 6.0 % |
| Bombeo normal | 2.0 % |
| Pendiente máxima | 7% |
| Pendiente mínima | 0.5% |

*Fuente propia*

*Ilustración 14. Diseño Planta y Perfil*




Fuente propia

*Ilustración 15. Detalle de perfil*

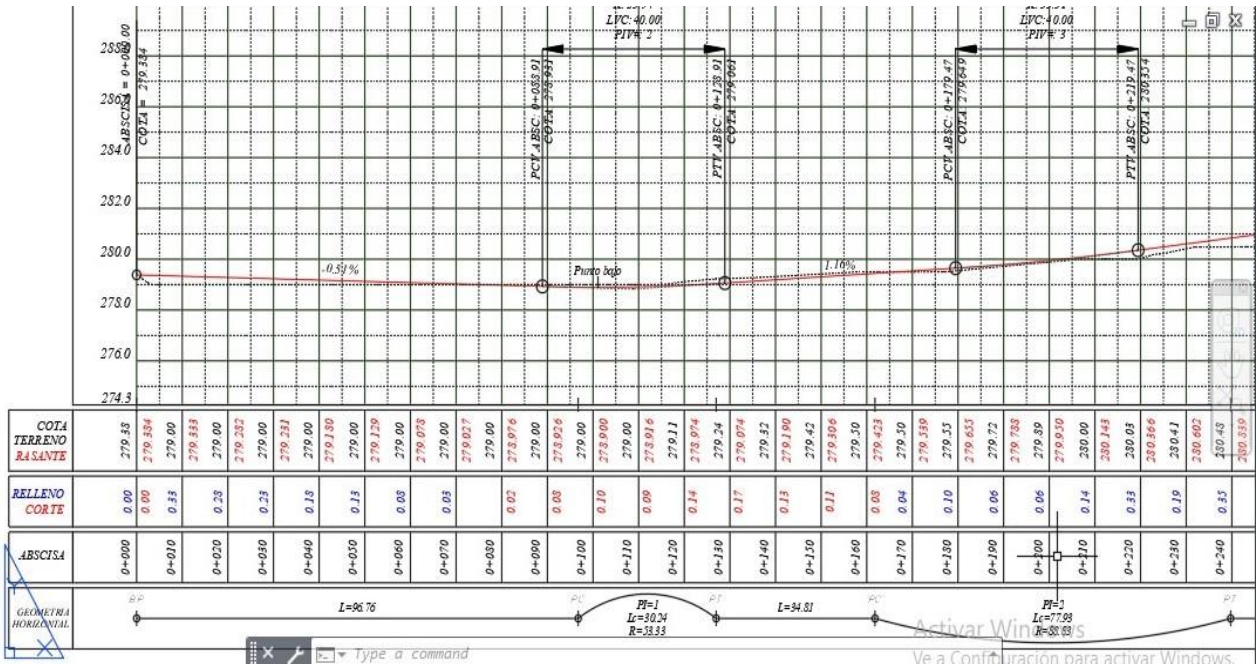
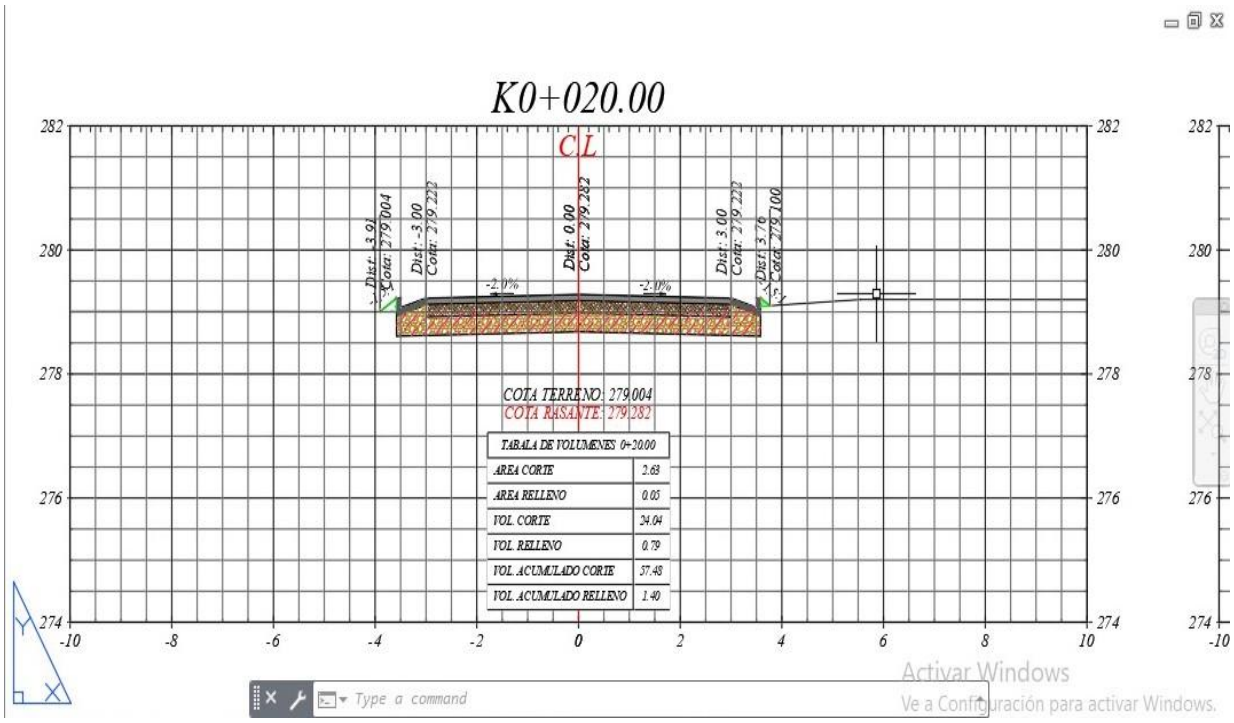


*Ilustración 16. Secciones Transversales*



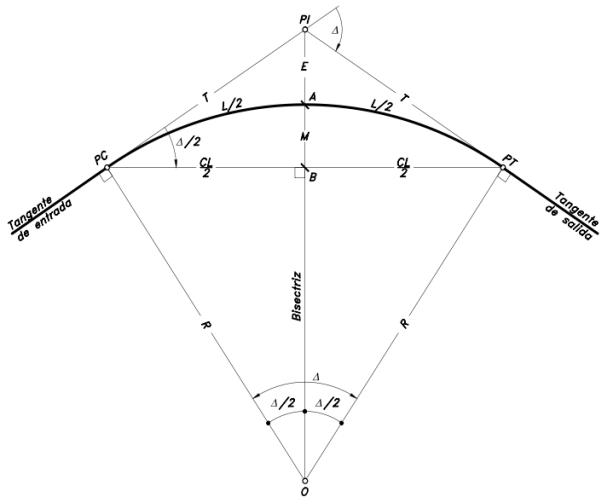

## 9.9 DISEÑO DEL ALINEAMIENTO HORIZONTAL

El alineamiento horizontal se inició con el trazado preliminar de las vías, tomando como punto de partida las condiciones existentes, al cual se le implanto la topografía, creando así una sola base de datos para posteriormente diseñar el corredor con la mayor exactitud posible, teniendo como objetivo favorecer la funcionalidad técnica y estética de la vía.

### 9.9.1 Formulación de cálculo de curvas horizontales

Formulación utilizada para el cálculo de las curvas horizontales conforme al manual geométrico de Invías 2008 Capítulo 3 – Diseño en Planta del Eje de la carretera, numeral 3.1.1.1. Empalme circular simple.

*Ilustración 17. Elementos de las curvas horizontales*




*Fuente: Manual de Invías.*

PI: Punto de cruce de dos tangentes que forman el empalme.

PC: Punto de inicio del empalme.

PT: Punto final del empalme.

Δ: Ángulo de deflexión en el PI, en grados o radianes.

R: Radio del arco circular, en metros.

LC: Longitud del arco circular, en metros.

T: Tangente del empalme, en metros.

C: Cuerda unitaria.

$$T = R * Tan\frac{\Delta}{2}$$

$$CL = 2R * Sen\frac{\Delta}{2}$$

$$GC = 2arcsen\frac{c}{2R}$$

$$LC = 2arcsen\frac{c\Delta}{GC}$$

*Tabla 23. Estudio de velocidades.*

| # | Radio (m) | Peralte (%) | Deflexion | Vch (km/h) | Entretang. Chequeo (m) | Arco Circular (m) | Vch Avance (km/h) | Vch Contra (km/h) | Velocidad Especifica Propuesta Vch (km/h) | Radio Mínimo (m) | Radio Siguiente (m) | | L_Trans. Mínimo Ds_Máximo (m) | L_Trans. Máximo Ds_Mínimo (m) | Entretang. Mínima (m) | Long. Mínima Arco Circular (m) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PI | | | g,m,s I/D | | | | | | | | Mín | Máx | | | | |
| Inicial | | | | | 96,76 | | 30 | | | | | | | | | |
| 1 | 53,331 | 4,69 | 32,29,4 D | 30 | 34,808 | 30,24 | 30 | 30 | **30** | 21 | 36,67 | 80 | 10,99 | 46,89 | 41,67 | 16,67 |
| 2 | 88,829 | 3,9 | 50,16,4 I | 30 | 21,73 | 77,93 | 30 | 30 | **30** | 21 | 59,18 | 133,24 | 9,15 | 39,02 | 125 | 16,67 |
| 3 | 200 | 2,71 | 25,17,27 I | 30 | 60,926 | 88,28 | 30 | 30 | **30** | 21 | 131 | 332 | 6,35 | 27,09 | 41,67 | 16,67 |
| 4 | 73,301 | 4,17 | 34,43,47 D | 30 | 130,561 | 44,43 | 30 | 30 | **30** | 21 | 50,99 | 109,95 | 9,78 | 41,74 | 125 | 16,67 |
| 5 | 200 | 2,71 | 4,57,43 D | 30 | 110,611 | 17,32 | 30 | 30 | **30** | 21 | 131 | 332 | 6,35 | 27,09 | 41,67 | 16,67 |
| 6 | 68,194 | 4,28 | 34,22,56 I | 30 | 22,131 | 40,92 | 30 | 30 | **30** | 21 | 48,19 | 102,29 | 10,04 | 42,85 | 125 | 16,67 |
| 7 | 71,202 | 4,22 | 36,46,51 I | 30 | 1,285 | 45,71 | 30 | 30 | **30** | 21 | 50,36 | 106,8 | 9,89 | 42,18 | 41,67 | 16,67 |
| 8 | 63,918 | 4,38 | 24,47,29 D | 30 | 9,527 | 27,66 | 30 | 30 | **30** | 21 | 43,92 | 95,88 | 10,26 | 43,8 | 125 | 16,67 |
| 9 | 42,66 | 5,09 | 26,20,10 D | 30 | 51,83 | 19,61 | 30 | 30 | **30** | 21 | 31,33 | 63,99 | 11,94 | 50,94 | 125 | 16,67 |
| 10 | 52,396 | 4,72 | 30,59,11 D | 30 | 59,195 | 28,34 | 30 | 30 | **30** | 21 | 36,2 | 78,59 | 11,06 | 47,2 | 41,67 | 16,67 |
| 11 | 27,651 | 5,81 | 49,6,25 I | 30 | 71,075 | 23,7 | 30 | 30 | **30** | 21 | 18,83 | 41,48 | 13,62 | 58,1 | 125 | 16,67 |
| 12 | 64,841 | 4,36 | 33,17,26 I | 30 | 42,405 | 37,67 | 30 | 30 | **30** | 21 | 44,84 | 97,26 | 10,22 | 43,59 | 41,67 | 16,67 |
| 13 | 61,415 | 4,45 | 21,26,46 D | 30 | 15,684 | 22,99 | 30 | 30 | **30** | 21 | 41,42 | 92,12 | 10,42 | 44,45 | 125 | 16,67 |
| 14 | 35,904 | 5,4 | 54,46,50 D | 30 | 35,374 | 34,33 | 30 | 30 | **30** | 21 | 25,9 | 53,86 | 12,67 | 54,05 | 41,67 | 16,67 |
| 15 | 93,123 | 3,84 | 28,9,22 I | 30 | 98,871 | 45,76 | 30 | 30 | **30** | 21 | 62,19 | 140 | 9 | 38,41 | 125 | 16,67 |
| 16 | 25,774 | 5,86 | 25,12,9 I | 30 | 12,254 | 11,34 | 30 | 30 | **30** | 21 | 17,89 | 38,66 | 13,74 | 58,64 | 41,67 | 16,67 |
| 17 | 22,948 | 5,94 | 41,35,28 D | 30 | 57,452 | 16,66 | 30 | 30 | **30** | 21 | 16,47 | 34,42 | 13,93 | 59,44 | 125 | 16,67 |
| 18 | 27,524 | 5,81 | 25,22,45 D | 30 | 3,332 | 12,19 | 30 | 30 | **30** | 21 | 18,76 | 41,29 | 13,63 | 58,14 | 41,67 | 16,67 |
| 19 | 9,932 | 6 | 47,38,30 I | 30 | 10,742 | 8,26 | 30 | 30 | **30** | 21 | 9,93 | 24,92 | 14,06 | 60 | 41,67 | 16,67 |
| 20 | 32,215 | 5,59 | 79,32,56 D | 30 | 15,387 | 44,73 | 30 | 30 | **30** | 21 | 22,21 | 48,32 | 13,1 | 55,89 | 125 | 16,67 |
| 21 | 37,167 | 5,34 | 33,30,51 D | 30 | 10,485 | 21,74 | 30 | 30 | **30** | 21 | 27,17 | 55,75 | 12,52 | 53,42 | 41,67 | 16,67 |
| 22 | 9,847 | 6 | 103,31,31 I | 30 | 45,21 | 17,79 | 30 | 30 | **30** | 21 | 9,85 | 24,83 | 14,06 | 60 | 125 | 16,67 |
| 23 | 43,691 | 5,05 | 24,27,52 I | 30 | 5,519 | 18,66 | 30 | 30 | **30** | 21 | 31,85 | 65,54 | 11,84 | 50,52 | 0 | 16,67 |
| Final | | | | | | | | 30 | | | | | | | | |

*Tabla 24. Resumen de parámetros de diseño del proyecto.*

| PI# | Sentido | Coordenadas | Delta | Abscisas | | Longitud | Tangente | Radio | Longitud |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | PI | | PC | PT | Total | Entrada | | Circular |
| | I/D | N,E (m) | g,m,s,ID | m | m | m | m | m | m |
| K0+000 | | 1718264.425, 4687044.681 | | | | | | | |
| 1 | D | 1718376.705, 4687046.589 | 32,29,4 D | K0+096.76 | K0+127.00 | 30.24 | 15.54 | 53.33 | 30.24 |
| 2 | I | 1718453.476, 4687097.320 | 50,16,4 I | K0+161.80 | K0+239.74 | 77.93 | 41.68 | 88.83 | 77.93 |
| 3 | I | 1718557.125, 4687066.006 | 25,17,27 I | K0+261.47 | K0+349.75 | 88.28 | 44.87 | 200.00 | 88.28 |
| 4 | D | 1718652.630, 4686979.708 | 34,43,47 D | K0+410.67 | K0+455.11 | 44.43 | 22.92 | 73.30 | 44.43 |
| 5 | D | 1718813.439, 4686958.904 | 4,57,43 D | K0+585.67 | K0+602.99 | 17.32 | 8.67 | 200.00 | 17.32 |
| 6 | I | 1718953.689, 4686953.003 | 34,22,56 I | K0+713.60 | K0+754.52 | 40.92 | 21.10 | 68.19 | 40.92 |
| 7 | I | 1719007.265, 4686912.936 | 36,46,51 I | K0+776.65 | K0+822.36 | 45.71 | 23.67 | 71.20 | 45.71 |
| 8 | D | 1719018.296, 4686875.522 | 24,47,29 D | K0+823.64 | K0+851.30 | 27.66 | 14.05 | 63.92 | 27.66 |
| 9 | D | 1719040.407, 4686850.281 | 26,20,10 D | K0+860.83 | K0+880.44 | 19.61 | 9.98 | 42.66 | 19.61 |
| 10 | D | 1719110.960, 4686821.137 | 30,59,11 D | K0+932.27 | K0+960.60 | 28.34 | 14.52 | 52.40 | 28.34 |
| 11 | I | 1719196.353, 4686833.963 | 49,6,25 I | K1+019.80 | K1+043.50 | 23.70 | 12.63 | 27.65 | 23.70 |
| 12 | I | 1719274.670, 4686766.919 | 33,17,26 I | K1+114.57 | K1+152.25 | 37.67 | 19.39 | 64.84 | 37.67 |
| 13 | D | 1719295.085, 4686696.395 | 21,26,46 D | K1+194.65 | K1+217.64 | 22.99 | 11.63 | 61.42 | 22.99 |
| 14 | D | 1719323.094, 4686660.010 | 54,46,50 D | K1+233.32 | K1+267.65 | 34.33 | 18.60 | 35.90 | 34.33 |
| 15 | I | 1719400.358, 4686663.209 | 28,9,22 I | K1+303.03 | K1+348.79 | 45.76 | 23.35 | 93.12 | 45.76 |
| 16 | I | 1719515.600, 4686607.535 | 25,12,9 I | K1+447.66 | K1+459.00 | 11.34 | 5.76 | 25.77 | 11.34 |
| 17 | D | 1719532.427, 4686586.766 | 41,35,28 D | K1+471.25 | K1+487.91 | 16.66 | 8.72 | 22.95 | 16.66 |
| 18 | D | 1719603.820, 4686574.951 | 25,22,45 D | K1+545.36 | K1+557.55 | 12.19 | 6.20 | 27.52 | 12.19 |
| 19 | I | 1719617.197, 4686578.782 | 47,38,30 I | K1+560.88 | K1+569.14 | 8.26 | 4.39 | 9.93 | 8.26 |
| 20 | D | 1719652.898, 4686556.768 | 79,32,56 D | K1+579.88 | K1+624.61 | 44.73 | 26.82 | 32.22 | 44.73 |
| 21 | D | 1719688.702, 4686596.378 | 33,30,51 D | K1+640.00 | K1+661.74 | 21.74 | 11.19 | 37.17 | 21.74 |
| 22 | I | 1719693.809, 4686630.166 | 103,31,31 I | K1+672.22 | K1+690.01 | 17.79 | 12.50 | 9.85 | 17.79 |
| 23 | I | 1719756.043, 4686604.869 | 24,27,52 I | K1+735.22 | K1+753.88 | 18.66 | 9.47 | 43.69 | 18.66 |
| K1+759.398 | | 1719766.346, 4686593.979 | | | | | | | |

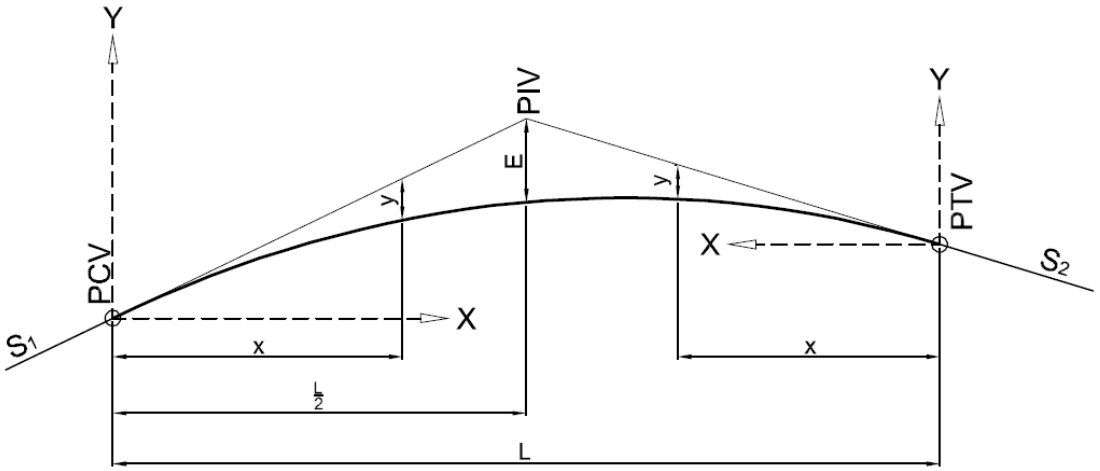
## 9.10 DISEÑO DEL ALINEAMIENTO VERTICAL

El diseño de alineamiento vertical comprende todo lo relacionado con el trazado de la rasante de diseño (pendientes, tangentes y curvas verticales) y el perfil del terreno natural, que a su vez está en función del diseño horizontal de la vía.

### 9.10.1 Formulación de cálculo de curvas verticales

Formulación utilizada para el cálculo de las curvas verticales conforme al manual geométrico de Invías 2008 Capítulo 4 – Diseño en Perfil del Eje de la carretera, 4.2.2.1. Elementos geométricos de la curva vertical simétrica.

*Ilustración 18. Elementos de curvas verticales*




*Fuente: manual de invias.*

Donde:

**PCV:** Principio de la curva vertical.
**PIV:** Punto de intersección de las tangentes verticales.
**PTV:** Terminación de la curva vertical.
**L:** Longitud de la curva vertical, medida por su proyección horizontal, en metros.
**S1:** Pendiente de la tangente de entrada, en porcentaje (%).
**S2:** Pendiente de la tangente de salida, en porcentaje (%).
**A:** Diferencia algebraica de pendientes, en porcentaje (%), o sea
**A:** ( S1 - S2 )
**E:** Externa. Ordenada vertical desde el PIV a la curva, dada en metros, se determina así:

$$\mathbf{E}=\frac{A*L}{800}$$

**x:** Distancia horizontal a cualquier punto de la curva desde el PCV o desde el PTV.
**y:** Ordenada vertical en cualquier punto, también llamada corrección de la curva vertical, se calcula mediante la expresión:

$$\boldsymbol{Y} = X^2\left(\frac{A}{200 * L}\right)$$

*Tabla 25. Diseño alineamiento vertical*

| PIV | LONGITUD CURVA VERTICAL (m) | | Pendiente (%) | | A | Tipo de | Abscisa, Cota (m) | | | Externa | Abscisa Cota Mínima | Cota Mínima | Abscisa Cota Máxima | Cota Máxima | K | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| # | Entrada | Salida | Entrada | Salida | % | Curva | PCV | PIV | PTV | m | m | m | m | m | Entrada | Salida |
| 0 | | | | | | | | 0.000,279.384 | | | | | | | | |
| 1 | 20 | 20 | -0.509 | 1.162 | 1.671 | Concava | 88.912,278.931 | 108.912,278.829 | 128.912,279.061 | 0.084 | K0+101.10 | 278.9 | | | 23.941 | 23.941 |
| 2 | 20 | 20 | 1.162 | 2.363 | 1.201 | Concava | 179.472,279.649 | 199.472,279.881 | 219.472,280.354 | 0.06 | | | | | 33.309 | 33.309 |
| 3 | 20 | 20 | 2.363 | -0.848 | -3.21 | Convexa | 310.965,282.515 | 330.965,282.988 | 350.965,282.818 | -0.161 | | | K0+340.40 | 282.863 | 12.46 | 12.46 |
| 4 | 18.105 | 18.105 | -0.848 | 1.227 | 2.075 | Concava | 413.539,282.288 | 431.644,282.134 | 449.749,282.356 | 0.094 | K0+428.34 | 282.225 | | | 17.452 | 17.452 |
| 5 | 20 | 20 | 1.227 | 7.651 | 6.424 | Concava | 482.213,282.755 | 502.213,283.000 | 522.213,284.530 | 0.321 | | | | | 6.227 | 6.227 |
| 6 | 14.25 | 14.25 | 7.651 | -5.695 | -13.346 | Convexa | 530.750,285.183 | 545.000,286.274 | 559.250,285.462 | -0.475 | | | K0+547.09 | 285.808 | 2.136 | 2.136 |
| 7 | 20 | 20 | -5.695 | -1.117 | 4.578 | Concava | 573.701,284.639 | 593.701,283.500 | 613.701,283.277 | 0.229 | | | | | 8.737 | 8.737 |
| 8 | 32.569 | 32.569 | -1.117 | 8.132 | 9.248 | Concava | 695.475,282.364 | 728.043,282.000 | 760.612,284.648 | 0.753 | K0+703.34 | 282.32 | | | 7.043 | 7.043 |
| 9 | 20 | 20 | 8.132 | -2.329 | -10.461 | Convexa | 788.443,286.911 | 808.443,288.538 | 828.443,288.072 | -0.523 | | | K0+819.54 | 288.176 | 3.824 | 3.824 |
| 10 | 15.686 | 15.686 | -2.329 | 1.164 | 3.493 | Concava | 927.311,285.769 | 942.997,285.404 | 958.683,285.586 | 0.137 | K0+948.23 | 285.526 | | | 8.981 | 8.981 |
| 11 | 20 | 20 | 1.164 | -6.131 | -7.294 | Convexa | 1099.007,287.219 | 1119.007,287.452 | 1139.007,286.226 | -0.365 | | | K1+105.39 | 287.256 | 5.484 | 5.484 |
| 12 | 12.041 | 12.041 | -6.131 | 8.505 | 14.635 | Concava | 1154.428,285.281 | 1166.469,284.542 | 1178.511,285.566 | 0.441 | K1+164.52 | 284.971 | | | 1.645 | 1.645 |
| 13 | 20 | 20 | 8.505 | -3.115 | -11.619 | Convexa | 1198.883,287.299 | 1218.883,289.000 | 1238.883,288.377 | -0.581 | | | K1+228.16 | 288.544 | 3.443 | 3.443 |
| 14 | 20 | 20 | -3.115 | 1.309 | 4.424 | Concava | 1272.859,287.319 | 1292.859,286.696 | 1312.859,286.958 | 0.221 | K1+301.02 | 286.88 | | | 9.042 | 9.042 |
| 15 | 20 | 20 | 1.309 | -9.015 | -10.324 | Convexa | 1415.000,288.295 | 1435.000,288.557 | 1455.000,286.753 | -0.516 | | | K1+420.07 | 288.328 | 3.874 | 3.874 |
| 16 | 37.435 | 37.435 | -9.015 | 10.387 | 19.403 | Concava | 1462.566,286.071 | 1500.000,282.697 | 1537.435,286.585 | 1.816 | K1+497.35 | 284.503 | | | 3.859 | 3.859 |
| 17 | 20 | 20 | 10.387 | 5.7 | -4.688 | Convexa | 1558.060,288.727 | 1578.060,290.805 | 1598.060,291.945 | -0.234 | | | | | 8.533 | 8.533 |
| 18 | 20 | 20 | 5.7 | -2.335 | -8.035 | Convexa | 1687.868,297.063 | 1707.868,298.203 | 1727.868,297.736 | -0.402 | | | K1+716.24 | 297.872 | 4.978 | 4.978 |
| 19 | | | | | | | | 1759.398,297.000 | | | | | | | | |

### 9.10.2 Transición de peralte

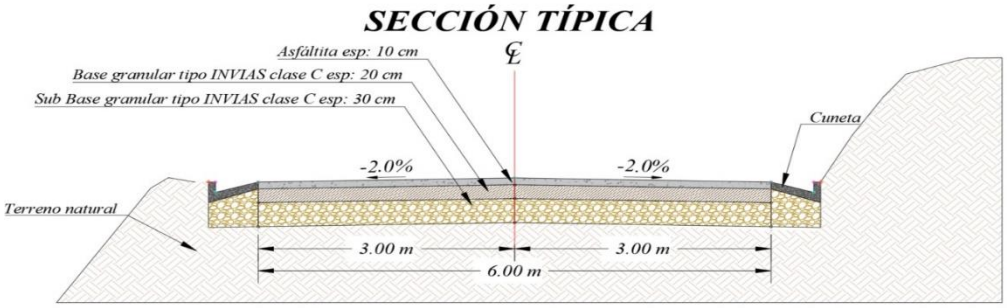
*Tabla 26. Diseño transición de peralte*

| PI | Delta | Radios (m) | Peraltes (%) | Longitud Transición (m) | | Vch | Longitud de aplanamiento N (m) | | Entretangencia (m) | | Pendiente Rampas de Peralte (%) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| # | g,m,s I/D | | | Entrada | Salida | Km/h | Entrada | Salida | Real | Chequeo | Entrada | Salida |
| 1 | 32,29,4 D | 53.331 | 4.689 | 16 | 5.333 | 30 | 6.825 | 2.275 | 34.808 | 34.808 | 0.879 | 2.638 |
| 2 | 50,16,4 I | 88.829 | 3.902 | 4.333 | 4.333 | 30 | 2.221 | 2.221 | 21.73 | 21.73 | 2.702 | 2.702 |
| 3 | 25,17,27 I | 200 | 2.709 | 3.666 | 11 | 30 | 2.707 | 8.121 | 60.926 | 60.926 | 2.217 | 0.739 |
| 4 | 34,43,47 D | 73.301 | 4.174 | 14 | 14 | 30 | 6.708 | 6.708 | 130.561 | 130.561 | 0.894 | 0.894 |
| 5 | 4,57,43 D | 200 | 2.709 | 11 | 11 | 30 | 8.121 | 8.121 | 110.611 | 110.611 | 0.739 | 0.739 |
| 6 | 34,22,56 I | 68.194 | 4.285 | 14 | 4.666 | 30 | 6.535 | 2.178 | 22.131 | 22.131 | 0.918 | 2.755 |
| 7 | 36,46,51 I | 71.202 | 4.218 | 4.666 | 5.309 | 30 | 2.213 | | 1.285 | 1.285 | 2.712 | 2.384 |
| 8 | 24,47,29 D | 63.918 | 4.38 | 5.643 | 5 | 30 | | 2.283 | 9.527 | 9.527 | 2.329 | 2.628 |
| 9 | 26,20,10 D | 42.66 | 5.094 | 5.666 | 17 | 30 | 2.225 | 6.675 | 51.83 | 51.83 | 2.697 | 0.899 |
| 10 | 30,59,11 D | 52.396 | 4.72 | 16 | 16 | 30 | 6.779 | 6.779 | 59.195 | 59.195 | 0.885 | 0.885 |
| 11 | 49,6,25 I | 27.651 | 5.81 | 19 | 19 | 30 | 6.54 | 6.54 | 71.075 | 71.075 | 0.917 | 0.917 |
| 12 | 33,17,26 I | 64.841 | 4.359 | 14 | 14 | 30 | 6.423 | 6.423 | 42.405 | 42.405 | 0.934 | 0.934 |
| 13 | 21,26,46 D | 61.415 | 4.445 | 15 | 4.999 | 30 | 6.749 | 2.249 | 15.684 | 15.684 | 0.889 | 2.667 |
| 14 | 54,46,50 D | 35.904 | 5.405 | 5.999 | 5.999 | 30 | 2.22 | 2.22 | 35.374 | 35.374 | 2.703 | 2.703 |
| 15 | 28,9,22 I | 93.123 | 3.841 | 4.333 | 13 | 30 | 2.256 | 6.769 | 98.871 | 98.871 | 2.659 | 0.886 |
| 16 | 25,12,9 I | 25.774 | 5.864 | 19 | 6.333 | 30 | 6.481 | 2.16 | 12.254 | 12.254 | | |
| 17 | 41,35,28 D | 22.948 | 5.944 | 6.333 | 19 | 30 | 2.131 | 6.393 | 57.452 | 57.452 | 2.816 | 0.939 |
| 18 | 25,22,45 D | 27.524 | 5.814 | 19 | 7.999 | 30 | 6.536 | | 3.332 | 3.332 | | |
| 19 | 47,38,30 I | 9.932 | 6 | 7.999 | 6.333 | 30 | | 2.111 | 10.742 | 10.742 | | |
| 20 | 79,32,56 D | 32.215 | 5.589 | 5.999 | 5.999 | 30 | 2.147 | 2.147 | 15.387 | 15.387 | 2.795 | 2.795 |
| 21 | 33,30,51 D | 37.167 | 5.342 | 5.999 | 5.999 | 30 | 2.246 | 2.246 | 10.485 | 10.485 | 2.671 | 2.671 |
| 22 | 103,31,31 I | 9.847 | 6 | 6.333 | 19 | 30 | 2.111 | 6.333 | 45.21 | 45.21 | 2.842 | 0.947 |
| 23 | 24,27,52 I | 43.691 | 5.052 | 17 | 17 | 30 | 6.73 | 6.73 | 5.519 | 5.519 | | |

### 9.10.3 Secciones utilizadas

El diseño de sección trasversal de este proyecto se llevó a cabo en base del urbanismo existente y el diseño de pavimento,

*Ilustración 19. Sección típica de una sola calzada*




*Fuente: Propia.*

# 10 Conclusiones

- Aunque las estructuras de pavimento se diseñaron en función de un periodo de diseño de diez (10) años, es procedente llevar a cabo una política permanente de mantenimiento periódico y rutinario de la vía, con el fin de controlar el deterioro prematuro de las mismas.

- El CBR de diseño fue de 4.80%

- El diseño geométrico del tramo de vía se realizó sobre una topografía Ondulada.

- Este estudio geométrico se realizó en gran medida considerando las condiciones del trazado actual, con el objetivo de maximizar la eficiencia en términos de la influencia en estructuras preexistentes, como canales de riego y edificaciones, además de minimizar las intervenciones en propiedades en áreas densamente pobladas.

- Por las razones anteriormente explicadas sobre el trazado de la vía se definió un ancho de 6.0m.

- La velocidad con la que se diseñó todos los elementos del corredor fue los siguientes: Velocidad de tramo homogéneo VTR: 30km/h y la velocidad específica de todos los elementos fue VE: 30km /h.

- El diseño geométrico entregado, tienen como norma guía lo establecido en el Manual de Diseño Geométrico del INVÍAS, optimizando algunos de los parámetros para garantizar su aplicabilidad al proyecto.

- Los cálculos de volúmenes de corte, relleno y cotas de subrasante se hicieron a partir del diseño vertical y sección trasversal, teniendo en cuenta una estructura propuesta por el diseño de pavimento.

- Se proyectó un alineamiento vertical y transversal de los corredores, optimizando los valores de volúmenes de corte y relleno.

# 11 Recomendaciones

- Se hace necesario el uso de un Geotextil NT 2500 que permita proteger la estructura de pavimento de la ascensión capilar del agua y posterior migración de finos hacia la subrasante.

- Todos los procedimientos de construcción y control ambiental deberán cumplir a cabalidad, con las exigencias establecidas en las Especificaciones Generales de construcción del Instituto Nacional de Vías INVIAS.

- Se sugiere realizar sistemas de drenajes como cunetas y alcantarillas, para drenar las aguas de escorrentía en longitudes establecidas por el diseñador hidráulico.

- Es importante incluir señalización vial tanto vertical como horizontal, dado el frecuente tránsito de animales silvestres, bovinos y equinos, también la demarcación de la via.

## Anexos

Anexo **A**. Archivo adjunto (.dwg) levantamiento y trazado topográfico

Anexo **B**. Archivo adjunto (.xlx) cartera de topografía

Anexo **C**. Archivo adjunto (.pdf) estudios de suelos-geotecnia

Anexo **D**. Archivo Adjunto. (.xlx) curvas horizontales-diseño geométrico

Anexo **E**. Archivo Adjunto. (.xlx) curvas verticales-diseño geométrico

Anexo **F**. Archivo Adjunto. (.xlx) peraltes-diseño geométrico

Anexo **G**. Archivo Adjunto.(dwg) planos generales(planta, perfil, secciones transversales)

## Bibliografía


Cárdenas, J. (2da. Ed) (2013) *Diseño Geométrico de Carreteras*.

https://www.academia.edu/91645057/Dise%C3%B1o_geometrico_de_carreteras_James_Cardenas_Segunda_Edicion

Departamento Nacional de Planeación subdirección territorial y de inversiones públicas, (2017) "construcción de pavimentos rígidos en vías urbanas de bajo tránsito". Versión 2.0

https://proyectostipo.dnp.gov.co/images/pdf/pavimento/PTpavimento.pdf

Cruz, D. & Salazar, W. (2019) Estudio del desempeño mecánico de una mezcla asfáltica natural, proveniente de la mina de pavas, en el departamento de Caquetá. (Tesis de grado) *Universidad Católica de Colombia.*

Garavito, V. (2021). *Asfaltita. (Tesis de grado) Universidad de los Andes*

https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/1a5151bf-6afe-4035-9b67-ca6f0913673e/content

Hernando, C. (2010) Nociones sobre métodos de diseño de estructura de pavimentos para carreteras. *Universidad Tecnológica y Pedagógica de Colombia.*

Instituto Nacional de Vías. Ministerio de Transportes, Instituto Nacional de Vías. (20089 MANUAL GEOMÉTRICO DE CARRETERAS. https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/proyectos-de-norma/11313-manual-de-diseno-geometrico-de-carreteras-2008

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Ministerio de Transportes, Instituto Nacional de Vías. (2013) Normas de Ensayos para Materiales de Carreteras. https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras

INVIAS (2013) *Manual de Diseño Geométrico de Carreteras*.

https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/especificaciones-tecnicas/985-manual-de-diseno-geometrico

Ministerio de transporte (s.f) Especificaciones generales de construcción de carreteras. https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/proyectos-de-norma/13929-proyecto-resolucion-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras/file

Narváez, L. (2017) *VÍAS TERCIARIAS: motor del desarrollo económico rural Tertiary roads: engine of rural economic development. Revista de ingeniería 45, 80-87*. https://www.redalyc.org/pdf/1210/121052004013.pdf